



TITLE:

水平密度噴流の数値解析法とその 温排水予測への応用に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

坪野, 考樹

CITATION:

坪野, 考樹. 水平密度噴流の数値解析法とその温排水予測への応用に関する研究. 京都大学, 2005, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2005-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r11634>

RIGHT:

水平密度噴流の数値解析法と
その温排水予測への応用に関する研究

2004 年 12 月

坪野 考樹

水平密度噴流の数値解析法と その温排水予測への応用に関する研究

2004 年 12 月

坪野 考樹

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景および目的	1
1.2	密度噴流における従来の研究	2
1.3	本研究の構成	3
第2章	複数管から水平放水された密度噴流の拡散特性と数値解析法	8
2.1	はじめに	8
2.2	水理実験による検討および考察	8
2.2.1	実験装置と測定方法	9
2.2.2	結果と考察	10
	(1) 密度噴流の経路特性	10
	(2) 噴流内での流速・水温の拡散特性	14
2.3	3次元数値モデルの構築と水理実験結果への適用	24
2.3.1	数値モデルの概要	24
	(1) 基礎方程式とその離散化	25
	(2) 計算条件	25
2.3.2	計算結果と実験結果との比較	26
	(1) 噴流の経路	28
	(2) 水面に浮上するまでの水温分布の比較	28
2.3.3	計算結果の考察	32
	(1) 噴流の経路と流速・水温の低減	32
	(2) 噴流の経路と横断面上の水温および圧力分布	37
2.4	まとめ	38
第3章	水中・表層放水口から同時放水された密度噴流の拡散特性と数値解析	43
3.1	はじめに	43
3.2	水理実験による検討および考察	44
3.2.1	実験装置および計測方法	44
3.2.2	実験結果の考察	45
	(1) 静水状態で放水した場合	45
	(2) 場の流れを考慮した場合	50

3.3	3次元数値モデルによる再現計算	55
3.3.1	計算条件	55
3.3.2	再現結果と考察	56
(1)	計算結果と実験結果の比較	56
(2)	再現性の考察	59
3.4	クラスター分析を用いた拡散形態の検討	60
3.4.1	クラスター分析の概要	60
3.4.2	水理実験結果への適用	61
(1)	クラスター分析に用いた鉛直分布	61
(2)	クラスター分析で得られた樹形図および分類された鉛直分布の形状	61
(3)	分類された鉛直分布の平面分布	63
3.4.3	計算結果への適用	67
(1)	クラスター分析に用いた鉛直分布	67
(2)	クラスター分析で得られた樹形図および分類された鉛直分布の形状	67
(3)	分類された鉛直分布の平面分布	69
3.5	まとめ	70
第4章	表層および水中により同時放水される温排水の実海域における拡散特性と数値解析	75
4.1	はじめに	75
4.2	実海域での観測	76
4.2.1	調査概要	76
4.2.2	温排水の拡散形態	78
(1)	温排水の水平分布	78
(2)	温排水層厚の変化	80
4.3	3次元数値モデルの変更点と条件設定	83
4.3.1	モデルの変更点	83
4.3.2	粘性係数	83
4.3.3	潮汐流動の再現	84
4.3.4	数値計算の諸条件	85
(1)	計算範囲・メッシュ等	85
(2)	境界条件・放水口条件・渦動粘性拡散係数	86
(3)	潮汐流動の計算条件	87
4.4	計算結果	88
4.4.1	観測期間中の計算条件を用いた計算結果(計算ケース1)	88
(1)	潮流楕円	88
(2)	表層での温排水拡散	91
(3)	水中放水口近傍の水温鉛直分布	92
(4)	数値解析結果から得られた水中放水口近傍の拡散現象	92
4.4.2	温排水拡散範囲予測(計算ケース2)	95

4.5	まとめ	97
第5章	複雑な放水口形状に適用するためのネスティング手法を用いた数値モデルの効率化	101
5.1	はじめに	101
5.2	3次元数値モデルのネスティング方法	103
5.2.1	ネスティングにおけるアルゴリズム	103
5.2.2	内挿法	104
5.2.3	圧力計算	106
5.2.4	大・小領域の接合部における 1,2-way ネスティングの違い	106
5.3	1-way ネスティング法の検討	107
5.3.1	計算条件	107
5.3.2	計算結果	110
5.4	2-way ネスティング法の検討	113
5.4.1	計算条件	113
5.4.2	計算結果	114
5.4.3	温排水拡散予測手法の提案	119
5.5	まとめ	120
第6章	結論	124

第1章

序論

1.1 研究の背景および目的

臨海発電所では、発電所内の復水器における水蒸気の冷却水として海水が利用されており、冷却水は、復水器を通過することにより約7℃暖められた後、海域に放水される。この放水された冷却水は、海域の水温よりも高くなることから、一般に温排水と呼ばれている。海域に放水される温排水の拡散挙動・範囲は、温排水の環境影響影響への配慮から、建設時または増設時において予測が必要となる。

従来まで、発電所から放出される温排水の拡散予測においては、数値解析や水理実験によって実施されてきた。例えば、表層放水が採用されている発電所では、温排水の鉛直分布について相似性を仮定した平面2次元モデルによる数値解析が拡散範囲予測に用いられてきた。一方、水中放水が採用されている発電所の場合では、実験水槽の制約により、放水流量が小さい場合において水理実験が、そして放水流量が大きな場合において、放水口近傍の温排水の浮上点付近の水理実験結果を境界条件とし、仮想的な放水口を設定した平面2次元モデルが、拡散範囲予測に用いられてきた。

しかし、近年の新規立地および発電所の増設においては、大流量の温排水の集中化に伴い、環境面の配慮から、水中放水口が近接して多数箇所設置されるケースや、温排水が表層放水されている海域に放水形式が異なる水中放水方式が近接設置されるケースが現れてきており、このようなケースについて、環境影響評価に伴う温排水拡散範囲予測を行う必要が生じてきた。このようなケースにおける温排水の挙動は、3次元性が強いことが予想され、平面2次元モデルでは精度よく再現することが難しいと予想される。

3次元性の強い温排水の拡散現象を、精度よく予測できる手法として、3次元数値モデルによる数値解析手法が考えられる。3次元数値モデルは、水理実験では再現が困難な放水口近傍の噴流による拡散現象、および海域流動による移流・拡散現象を同時に扱うことが可能で、高温域から低温域までを再現することが出来る。さらに、数値解析では、水理実験と比較して、迅速かつ多くのケースを検討出来るといった利点があることから、取放水施設の設計変更に対する迅速な対応、および予測コストの低減につながることも期待される。そして、3次元モデルによる予測手法が実用化されれば、予測手法の多様化を図ることが出来、電源立地の円滑な推進に貢献することが出来る。

上述した背景から、3次元温排水拡散予測モデルの構築・実用化が望まれている。ただし、3次元拡散予測モデルでは、放水初期の乱流現象の再現性の向上が非常に重要となるために、放水口近傍を詳細なメッシュを用いて計算する必要がある。そのため、放水口近傍領域の高温域から沖合い数km遠方の低温域までを計算するためには、膨大な記憶容量と高速の計算機が必要となるが、近年の飛躍的な計算機性能

の向上を背景に、3次元数値モデルによる温排水拡散予測が可能となってきた。

1.2 密度噴流における従来の研究

噴流は、ある速度を持った流体がある狭い空間-ノズルやオリフィス-から放出される流れを意味し、工学的な視点から、非常に古くから数多くの研究がなされてきた(例えば, [Rajaratnam, 1980; 石垣, 1981a, 1981b, 1982] 等)。そして、本研究で検討する温排水は、噴流として放出される流体と周囲流体との密度差があることから、密度噴流と呼ばれ、発電所から海域に放出される温排水の、および河川から放出される淡水の拡散現象を対象として、数多くの研究がなされている(例えば, [Jirka, 1982; 椿ら, 1978; 室田ら, 1991; 中辻ら, 1991b; 有田ら, 1986] 等)。

海域に放水される温排水は、放水口近傍においては、主に放水流体の有する運動量と周囲流体との密度差に起因する浮力によって支配され、運動量が小さくなる遠方域になると、浮力と海域の条件に支配される。そのため温排水の拡散形態は、放水流量、放水流速・密度などの放水の条件、放水口の形式・形状・大きさ・方向・配置などの放水方法、および海域の流れなど周囲水の環境条件に支配される。

密度噴流の拡散形態に影響を与える放水形式であるが、本研究の対象となる発電所からの温排水は、表層放水方式および水中放水方式の二つの放水形式によりに放水される。これらの放水形式は、文字通り、表層放水方式では自由水面を有する放水口により、また水中放水方式では、水中に設置された放水口から構成される。

表層放水口から放水される温排水は、自由水面をもつ放水口から放水される密度噴流であり、この温排水の拡散形態は、笠井ら(2003)が分類したように、初期流速が速い場合での河口流出水と同様な拡散形態を示す。これら表層で放水される密度噴流は、2次元表面密度噴流(椿ら, 1978)、二次元表層密度噴流[室田ら, 1990]、二次元表層放出密度流[有田ら, 1986]、および平面二次元密度噴流[福嶋, 1984]などと呼ばれ、温排水の拡散範囲予測および河川水の拡散形態の把握などの問題から、放水直後の初期混合に関する研究[Luketina and Imberger, 1987; 有田ら, 1986]、鉛直方向の連行に関する研究[室田ら, 1983; 椿ら, 1978]、流動がある場合の噴流の経路・水温の拡散範囲に関する研究[Bocard, 1984]など、古くから多くの観測・実験・理論的研究がなされている。そして、これらの研究より、表層放水される密度噴流は、放水直後に鉛直方向に混合した後、放水口近傍では噴流の運動量が大きなことから、噴流として発達し、下層から周囲水を連行して混合するが、密度の効果により表層で鉛直方向に薄く拡散し、十分に発達した後、各変数の表層の値で正規化した鉛直分布は、表層で最も大きな値をとる Gauss 分布となり、ほぼ相似な形状となることが知られている。

水中放水口から放水される温排水は、水中に設置された放水口から放水される。放水の向きは、底面掘削を避けるために水平・鉛直上向きの角度が取られることが多いが、わが国では、発電所付近での水深が浅いため、噴流の放水口から表層までの経路長が長く、水面での希釈がよくなる水平方向に放水する放水口が採用される場合が多い。また、水中放水口での放水流速は、表層放水口と比較して、3から10倍程度で放水される。このため、水中放水口から放水された温排水は、初期の運動量により噴流として直進しつつ、浮力の影響を受けて鉛直上向きに方向を変え、表層に浮上した後、表層において2次元噴流的に拡散する。

表層に浮上後での温排水は、放水流速が大きい、および設置水深が大きい放水条件において、希釈がよ

なることが一般に知られている。そのため、放水口径が小さいほど、流速を速くすることが出来、さらに口径と水深の相対水深が大きくなることから、水中放水口の形状においては、単一管ではなく、複数管(マルチパイプ方式やスロット状の放水口)が採用される場合が多い。

水平に水中放水される密度噴流の浮上までの挙動・拡散形態に関する研究は、古くから行われ、噴流の経路・希釈特性に関する研究[例えば片野, 1983; 石垣, 1981a, 1981b, 1982], 噴流の経路をラグランジェ的に取り扱い、実験結果と比較した研究[例えば Bemporad, 1994, Johnston and Volker, 1993]等がなされている。また、複数管から放水される噴流および密度噴流の研究は、Jirka(1982)が様々な複数管からの噴流の拡散形態について実験的研究を実施している。また片野(1983), Pani and Dash(1983)も、複数の噴流が相互干渉して一つの噴流となった後の拡散形態について実験的研究を行っている。

数値モデルの構築およびモデルを用いた研究は、1970年代からなされてきている。表層放水された温排水に関わる研究では、鉛直方向に積分し、希釈特性を考慮した2次元モデル[例えば、室田ら, 1984]や温排水の鉛直分布が相似形であると仮定した従来までの温排水拡散予測に使用しているモデル等、水平2次元モデルが計算機導入当初より研究されてきた。そして、計算機の充実とともに3次元のモデルにより研究がなされ、例えば中辻ら(1991b), (1991a)や、井上ら(1996), 都築ら(1992)は、静水圧近似を仮定した準3次元モデルを用いて、表層から放水される密度噴流の数値解析を実施している。

水中放水される密度噴流の数値モデルについては、実用上の問題が限られていることから、表層放水される数値モデルと比べて適用例が少ないが、水鳥ら(1992)により鉛直方向に放水する密度噴流に関して、仲敷ら(1996)により単管から水平放水される密度噴流に関して、坪野ら(1997b), Nakasiki et al.(1996), Kim et al. (2001)により複管から放水される密度噴流に関しての数値モデルを適用した研究が行われてきている。

1.3 本研究の構成

本研究では、近接設置された水中放水口および表層放水口から放水される温排水の拡散範囲予測が可能となる数値モデルの構築を行い、その適用性を検討することを目的としている。

モデルに関しては、水中放水された温排水が表層に達し、表層で海域流動により拡散するまでを計算できる3次元の数値モデルを構築した。そして、適用性の検討に関しては、放水口近傍領域を水中放水口から放水された噴流が表層まで浮上するまでと定義し、およびそれ以降の温排水拡散を遠方領域と定義し、それぞれの対象領域に対して水理実験・観測を実施し、温排水の拡散・特に表層・水中放水された温排水が相互干渉して拡散していく現象について考察を行い、その結果について3次元数値モデルの適用性の検討を実施した。

以下に、次章以下の構成について概要を述べる。

第2章では、3次元数値モデルの構築をし、複数管から水中放水された温排水の放水開始後から表層に浮上するまでの放水口近傍域について、モデルを適用し、再現性について検討を行った。まず、鉛直2次元水路を用いて、複数管から水平放水される密度噴流について水理実験を実施した。そして、この水理実験結果について、3次元数値モデルを適用し、結果の妥当性の検討および結果の考察を行った。

鉛直方向に放水する密度噴流の流速や水温の平均量および分布について、および乱流量については、室田ら(1989), (1991)や水鳥ら(1992), Johnston et al.(1993), Johnston et al.(1993), Chu et al.(1999)

等、多くの実験による研究がなされている。一方、水平方向に設置された場合の密度噴流が放出される測定は鉛直放水と比べて少なく、単管の場合において、例えば片野ら (1983) が流速および温度の分布、浮上経路や経路に沿った希釈特性について測定を、仲敷ら (1996) が単管の流速水温の平均値および乱流量の分布の計測を行っている。また、複数管からの噴流では、Pani et al. (1983)、片野ら (1983) が平均量の分布の計測を行っている。しかしながら、複数管からの密度噴流の乱流量についてはほとんど測定が行われておらず、平均量の分布についても十分とはいえない。以上のことから、2管から水平に放水される密度噴流について水理実験を行い、水温・流速の詳細な計測を行った。

水中放水口から水平に放水される温排水は、噴流としての運動量、および密度差からなる浮力により支配されることから、その経路は3次元的となり [片野, 1983]、鉛直方向の流速の変動を無視する静水圧近似とするモデルの適用は難しいと考えられる。また、発電所の放水口は、形状が複数管となることから、放水後の複数の噴流からなる拡散・混合および連行の取り扱いにおいて、水鳥ら (1992) や都築ら (1992) のように、半値幅等を用いて渦動粘性拡散係数を推定することが難しい。

最近、Kim et al. (2001) が複管から放水される密度噴流の乱流モデルを用いたモデルにより計算を行っているが、静水圧近似を仮定し、複管を1つのスロットで模擬していることから、浮上経路の再現性において疑問が残る。さらに、Kim et al. は、水面方向で正規化するシグマ座標系を用いており、水面形状が時々刻々と変化すると、放水口の形も時々刻々と変化することから、計算精度に問題があると考えられる。このため、本研究で構築する温排水拡散予測のモデルでは、非静水圧の3次元モデルとし、複数管それぞれを表現できるモデルとし、渦動粘性係数・拡散係数の推定に乱流モデル [小林ら (1995)、Chen and Tanaka, 1992] を用いた。

この3次元モデルを、実験結果に適用しすることにより、再現性の検討を行い、さらに、数値解析結果を用いて、噴流の経路等の拡散特性について検討を行った。

3章では、近接設置された表層放水口および水中放水口から放水される密度噴流の拡散現象の把握を目的に、平面水槽を用いた水理実験を行い、そして、2章では取り扱えなかった表層における温排水の拡散現象を対象として、2章で構築した3次元温排水拡散予測モデルの適用性の検討を行った。

近接設置された水中放水口・表層放水口から放水された密度噴流については研究が実施されておらず、これら密度噴流の研究・知見がほとんどない。そこで、本研究では、静穏な海域に、両放水口から放水される密度噴流の水理実験を行った。この実験と同時に、各放水形式で単独放水された密度噴流についても水理実験を行い、拡散形態の比較検討を行った。そして、海域流動がある場合の両放水口から放水される密度噴流の水理実験を行い、静穏な海域における結果との比較検討を行った。さらに、静穏な海域における温排水拡散結果に対して数値モデルを適用し、遠方域における表層での水平的な密度噴流の拡散現象に対して、モデルの適用性の検討を行った。

最後に、水中放水および表層放水された温排水が相互干渉した場合での、鉛直的な混合・拡散現象把握を目的として、水理実験および数値実験で得られた水温の鉛直分布について、客観的・自動的に分類分けが出来るクラスタ分析を適用し、水温の鉛直分布を分類し、各放水口からの温排水が相互干渉する領域について考察をおこなった。

4章では、実海域に放水される温排水を対象に観測を実施し、この観測結果について数値モデルの適用性の検討を行った。

実海域においては、表層放水される温排水の拡散域について、都築ら (1992) による熱赤外センサーを

用いた飛行機からの観測等がある。しかし、表層・水中放水口から同時放水される温排水については、実測データが少ないことから、実海域において近接設置された表層・水中放水口から放水される温排水の拡散形態について、観測を実施した。また、この海域では潮汐流が卓越していることから、特に各潮時における両放水口からの温排水の拡散形態について検討を行った。

実海域を対象に温排水拡散予測を行うために、数値モデルの改良を行った。前述したように、各放水口から放水された温排水は、密度噴流として十分発達した後、表層において拡散する領域においては、海域の流動の影響を受けて拡散する。本研究では、これらの拡散現象をモデルで再現するために、モデルの改良を行った。また、2、3章で構築したモデルでは、潮汐流を取り扱えないことから、海洋モデル等で順厚モードと傾圧モードを分けるモデルを参考にし、潮汐流を再現できるように、モデル改良を実施した。

改良したモデルを観測結果に適用し、本モデルで得られる温排水拡散現象と観測結果との比較を行い、特に水中放水された温排水と表層放水された温排水が相互干渉される領域において、適用性の検討を行った。さらに、環境影響評価における温排水拡散予測では、温排水の水温上昇域の包絡が求められることから、3次元温排水拡散モデルを用いて温排水の水温上昇域を計算し、モニタリングで得られた結果との比較検討を実施した。

5章では、4章までの結果に基づき、モデルの時間短縮および温排水拡散予測の手順短縮化の検討を行った。本モデルでは、放水口から海域に拡散する温排水予測を目的に構築したことから、放水口の形状をより正確に再現するために、放水口近傍では細かいメッシュで離散化している。計算時間短縮のために、非等方なメッシュを用いているが、実際的水中放水口は複数管で、複雑な形状をしていることから、計算点数が非常に多くなることがあり、これにより計算時間が増加する。そのため、計算時間の短縮する方法が望まれていることから、小メッシュで離散化される領域と大メッシュで離散化される領域を境界上でつなぐ方法、すなわちこれら2領域をネスティングする方法を用いて計算点数を削減する方法を検討した。

ネスティングは、2つの領域の情報を相互にやり取りする方法である2-way ネスティングと片方の領域から片方へと一方向に情報を伝える方法である1-way ネスティングの方法があり、それぞれの方法を採用して改良を行った。そして、ネスティングモデルによる結果と従来のモデルによる結果とを比較することにより、両ネスティング法の結果の妥当性の検討を行った。最後に、計算時間についても比較検討を行い、温排水拡散予測における両ネスティング法の使用法の提案を行った。

最後に、6章では、第2章～第5章で得られた主な成果をまとめて示し、本論文の結論を示す。

参考文献

- Bemporad, G. G., 1994: Simulation of Round Buoyant Jet in Stratified Flowing Environment. *J. Hydraulic Eng.*, **120**, 5, 529–543.
- Bocard, D. N., 1984: Surface Buoyant Jets in Stagnant Water. *J. Hydraulic Eng.*, **110**, 6, 831–835.
- Chen, C. J., 田中伸和, 1992: CHEN & TANAKA による乱流モデルの基礎と応用. 構造計画研究所.
- Chu, P. C. K., J. H. Lee and V. H. Chu, 1999: SPREADING OF TURBULENT ROUND JET IN COFLOW. *J. Hydraulic Eng.*, **125**, 2, 193–204.
- Jirka, G. H., 1982: Multiport Diffusers for Heat Disposal: A Summary. *J. Hydraulic Eng.*, **108**, 12, 1423–1468.
- Johnston, A. J. and E. Volker, 1993: Round Buoyant Jet Entering Shallow Water in Motion. *J. Hydraulic Eng.*, **119**, 12, 1364–1382.
- Kim, D. G. and I. W. Seo, 2001: Modeling the mixing of heated water discharged from a submerged multiport diffuser. *J. Hydraulic Res.*, **38**, 4, 259–269.
- Luketina, D. A. and J. Imberger, 1987: Characteristics of a Surface Buoyant Jet. *J. Geophys. Res.*, **92**, C5, 5435–5447.
- Nakashiki, N., S. Matsunashi, S. Sakai, T. Tsubono and K. Maruyama, 1996: Behavior of a horizontal buoyant jet discharged from a multiple pipe. *Flow Modeling and Turbulence Measurements VI*.
- Pani, B. and R. Dash, 1983: Three-Dimensional Single and Multiple Free Jets. *J. Hydraulic Eng.*, **109**, 2, 254–269.
- N. ラジャラトナム, 野村安正訳, 1980: 噴流. 森北出版.
- 井上和也, 古寄裕三, 奥寺健彦, 豊田政史, 1996: 沿岸域における河川流出水の拡がりの解析. 水工学論文集, **40**, 473–478.
- 笠井亮秀, 2003: 河川水と海水の結合点. 沿岸海洋研究, **40**, 2, 101–108.
- 室田明, 中辻啓二, 1991: ジェットとブルーム. 土木学会論文集, **429II-15**, 1–15.
- 室田明, 中辻啓二, 藪内生死, 1983: 二次元表層密度噴流における大規模渦運動に関する実験的研究. 土木学会論文集, **339**, 109–118.
- 室田明, 中辻啓二, 柴垣雄一, 1984: 積分モデルによる三次元表層密度噴流の解析. 土木学会論文集, **435III-2**, 117–125.
- 室田明, 中辻啓二, 玉井昌宏, 1989: 二次元フォーストブルームの乱流行象に関する実験的研究. 土木学会論文集, **42905II-11**, 79–87.

- 室田明, 中辻啓二, 中辻陽一, 1990: 二次元表層密度噴流の連行特性の乱流モデルによる検証. 土木学会論文集, **423II-14**, 197-200.
- 水鳥雅文, 片野尚明, 仲敷憲和, 1992: 鉛直重力噴流拡散予測モデルの開発. 研究報告:U 88051, 電力中央研究所.
- 数値流体力学編集委員, 1995: 乱流解析. 東京大学出版.
- 石崎博, 1981a: 乱流噴流の特性に関する研究 (第1報). 日本機械学会論文集, **48**, 1962-1700.
- 石崎博, 1981b: 乱流噴流の特性に関する研究 (第2報). 日本機械学会論文集, **48**, 1701-1708.
- 石崎博, 1982: 乱流噴流の特性に関する研究 (第3報). 日本機械学会論文集, **49**, 1650-1657.
- 中辻啓二, 許再寧, 室田明, 1991a: 河川ブルームの拡がり特性とその物理機構. 土木学会論文集, **434II-16**, 29-36.
- 中辻啓二, 許再寧, 室田明, 1991b: 三次元表層密度流の数値実験. 土木学会論文集, **363II-4**, 107-113.
- 仲敷憲和, 松梨史郎, 坂井伸一, 丸山康樹, 1996: 水平方向に放出された重力噴流の挙動について. 水工学論文集, **40**, 537-542.
- 椿東一郎, 小松利光, 1978: 2次元表面密度噴流における流れの特性と連行現象. 土木学会論文集, **273**, 69-81.
- 坪野考樹, 仲敷憲和, 松梨史郎, 坂井伸一, 丸山康樹, 1997: 複数管から放出された水平重力噴流に関する数値シミュレーション. 水工学論文集, **41**, 295-302.
- 都築進, 大久保嘉雄, 川永充人, 安達欣也, 水鳥雅文, 1992: 大容量発電所における温排水拡散実態について. 海岸工学論文集, **39**, 940-944.
- 福嶋祐介, 1984: $k-\epsilon$ モデルによる平面二次元密度噴流と噴流の相似解析. 土木学会論文集, **405II-11**, 147-154.
- 片野尚明, 1983: 水中放流方式による温排水の混合希釈家庭に関する研究. 博士論文, 日本大学.
- 有田正光, G. H. JIRKA, 玉井信行, 1986: 二次元表層放出密度流の流動形態と混合に関する研究. 土木学会論文集, **375II-6**, 61-67.

第2章

複数管から水平放水された密度噴流の拡散特性と数値解析法

2.1 はじめに

環境影響評価における温排水拡散予測では、発電所から放水された温排水の表層での水温上昇域を予測する。水中放水口から水平に放水された温排水は、放水後に密度による浮力の影響により、経路を鉛直上向きに変化し、表層に浮上した後、表層で拡散する。片野 (1983), 仲敷ら (1996), Johnston et al. (1994) および Johnston and Volker (1993) によると、放放水口の設置位置および放水条件により、放水された密度噴流の浮上経路が変化することを示しており、表層での拡散域のはじまりとなる噴流の浮上位置を正確に予測することが、温排水拡散予測においては重要となる。

臨海発電所における水中放水口では、一般に複数管を用いられている。放水口近傍での噴流は、近接する各噴流による相互作用をうけ、連行が抑制されて複雑な拡散挙動を示し、噴流の経路が3次元的事となることが予想される。しかし、単管より放出された水平密度噴流については、従来より多くの水理実験や数値計算 (例えば, [片野, 1983; 仲敷ら, 1996] 等) が行われているが、複数の放水管より放出された噴流内では、拡散特性の実態が十分に把握されていない。また、複数管からの噴流の連行等の再現には、 $k-\epsilon$ モデルのような乱流モデルが考えられるが、単管からの噴流に対しては、福嶋 (1984) が実施した次元解析によって、再現性が高いことが示されているが、複数管からの密度噴流に対しての研究はあまりなされていない。そこで、本章では、複数管 (2 管) から水中放水された温排水の拡散特性を水理実験により明らかにするとともに、乱流モデルを用いた3次元数値モデルの適用性を検討する。

本章の2節において水理実験の内容・結果を、3節において3次元数値モデルの概要を、4節において水理実験結果に3節で示した3次元数値モデルを適用した結果について、記述する。

2.2 水理実験による検討および考察

本実験では、水平方向に放出された密度噴流の挙動を解明するため、水温、流速について測定を行い、以下の項目について検討を行った。

1. 複数水中放水管 (2 管) より放出された水平密度噴流について、経路や希釈倍率等の平均的な拡散・

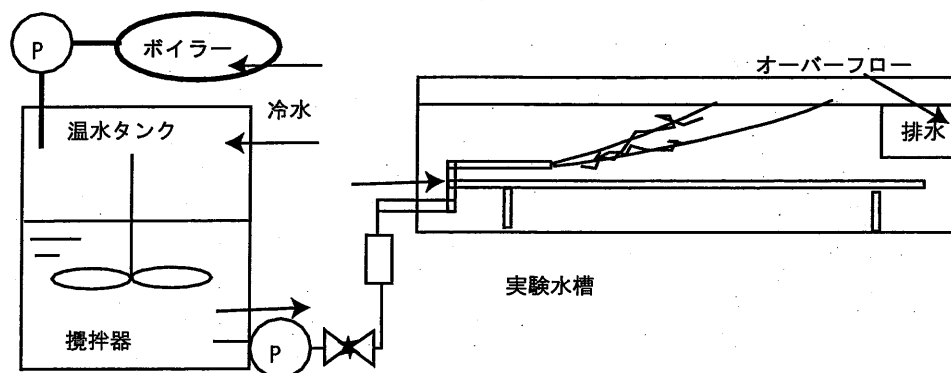


図 2.1 実験装置の概略

希釈特性について測定を行い、その拡散パターンを明らかにする。

2. 放出された水平密度噴流内の流速変動や水温変動を同時計測し、流速・水温の平均量、乱流量について検討を行う。

単管から水平方向に放水される密度噴流の実験 [片野,1983; 仲敷ら,1996; Johnston et al.,1994] によると、放水条件により密度噴流の浮上経路が異なることが指摘されている。そこで、詳細な流速・水温の同時測定を行う前に、まず放水深度、放水条件を変更した水理実験において水温測定を行い、密度噴流の浮上経路について検討を行った。そして、これら水理実験のうち、代表的な条件を選定して、浮上経路沿いに流速・水温の同時測定を行い、密度噴流の連行・拡散挙動について検討を行った。

2.2.1 実験装置と測定方法

図 2.1 に、本実験で使用した装置の概略を示す。実験には、長さ 10m、幅 1m、高さ 1m の二次元水路を使用した。水路の両側面は、レーザードップラー流速計による計測のために透明なガラス製となっている。

実験では、水路内において仕切り板を設置し、長さ 6m、幅 0.7m を測定区間として実験を行った。また、水路下流端より、放水量と同量の排水を行った。これにより測定時間および測定区間内では、流速分布や温度分布はほぼ一定に保たれており、現象は準定常とみなすことができる。

放水管は、放水水深を任意に変化できるように、水路底部からの高さを可動式とした。本実験に用いた放水口の直径 d は 1.9 cm で、噴流内部の流速変動や水温変動を測定するのに十分な大きさとした。また放水口直径を長さスケールとして計算した放水口でのレイノルズ数は数千程度であり、十分に乱流状態となっている。

流速の測定には、2 方向成分を測定できるレーザードップラー流速計 (Fiberoptic Laser Velocimeter : FLV) を使用した。流速測定と同時にを行う水温の変動成分の測定には、乱流成分が十分に計測できるように、周波数応答が速い熱電対を使用した。

静止水域に水平に放水された密度噴流は、2 つの噴流の中心軸に対して左右対称な現象となることから、2 管の中心から 1 つの放水口の中心までを測定区間とした。各測点で計測された流速 (水平成分および鉛直成分) と水温は、サンプリング・タイム 0.005 秒で A / D 変換を行い、8192 個 (約 40 秒) のデー

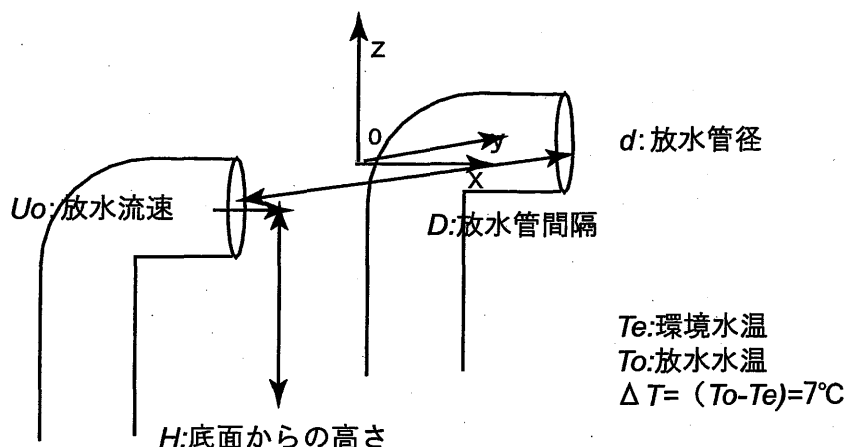


図 2.2 放水口の概略および座標系の定義

タを収録した。測定されたデータについては、統計解析を行い、平均量・変動量の計算を行った。

図 2.2 に、放水口の概略および座標系の定義を示す。ここに、 U_0 ：放水流速、 T_o ：放水水温、 T_e ：環境水温、 d ：放水口径、 H ：底面から放水口中心までの高さ、 D ：放水口間隔、 ρ_o ：放水密度、 ρ_e ：環境密度、 $\Delta\rho/\rho_e$ ($\Delta\rho = \rho_e - \rho_o$)：温排水と周囲水の密度差、 g ：重力加速度、 $\text{Fro}(= U_0/\sqrt{(\Delta\rho/\rho_e) \cdot g \cdot d})$ ：放水口での内部フルード数、 $\text{Re}(= U_0 \cdot d/\nu)$ ：放水口でのレイノルズ数である。また、座標については、2管の放水端それぞれの中心を結ぶ線分の中央を原点とし、流下方向に x 軸、原点から放水口方向に y 軸、原点から鉛直方向に z 軸とする。

2.2.2 結果と考察

底面近傍で単管から水平に放水された密度噴流は、放水口での内部フルード数や放水口の位置によって、その浮上経路や希釈特性が異なることが知られている [例えば、片野, 1983, 仲敷ら 1996, Johnston et al., 1994]。そのため流速・水温を同時測定するには、密度噴流の経路をあらかじめ知る必要があり、まず放水口での内部フルード数や放水口高さ、および放水口間隔を変化させ、これら放水条件による噴流の拡散形態に及ぼす影響について検討した。そして、これら実験のうち代表的な拡散パターンについて、FLV や熱電対を用いた噴流内の流速や水温の同時測定を行った。

(1) 密度噴流の経路特性

仲敷ら (1996) や Johnston et al. (1994) の単管を用いた実験では、放水条件 (放水流速, 放水高さ) により、噴流の経路が、放水直後に浮上するパターン、および底面を這うパターンとなることが示されている。また、FLV や熱電対を用いた計測では、点でしか観測できないことから、拡散形態を効率的かつ正確に計測するためには、密度噴流の軌跡沿いを計測する必要がある。そこで、本研究では複数管における温排水の軌跡を把握するために、放水流速、放水高さに加えて放水口間隔を変化させて温排水放水実験を行い、水温測定により密度噴流の経路について検討を行った。表 2.1 に、実験条件を示す。本実験では、放

水直後における噴流の軌跡の測定を目的としていることから、サーミスタによる水温測定のみを行った。

表 2.1 実験条件

実験ケース	放水口径 $d(\text{cm})$	放水口間隔 D/d	放水口高さ H/d	放水流速 $U_o(\text{cm/s})$	放水温度 $\Delta T(^{\circ}\text{C})$	内部フルード数 Fr
A-1	1.9	5.0	3.0	23.1	7.0	11.0
A-2	1.9	5.0	3.0	34.6	7.0	16.5
A-3	1.9	5.0	3.0	46.2	7.0	22.0
B-1	1.9	5.0	2.0	23.1	7.0	11.0
B-2	1.9	5.0	2.0	34.6	7.0	16.5
B-3	1.9	5.0	2.0	46.2	7.0	22.0
C-1	1.9	5.0	1.0	23.1	7.0	11.0
C-2	1.9	5.0	1.0	34.6	7.0	16.5
C-3	1.9	5.0	1.0	46.2	7.0	22.0
D-1	1.9	7.5	3.0	23.1	7.0	11.0
D-2	1.9	7.5	3.0	34.6	7.0	16.5
D-3	1.9	7.5	3.0	46.2	7.0	22.0
E-1	1.9	7.5	2.0	23.1	7.0	11.0
E-2	1.9	7.5	2.0	34.6	7.0	16.5
E-3	1.9	7.5	2.0	46.2	7.0	22.0
F-1	1.9	7.5	1.0	23.1	7.0	11.0
F-2	1.9	7.5	1.0	34.6	7.0	16.5
F-3	1.9	7.5	1.0	46.2	7.0	22.0
G-1	1.9	10.0	3.0	23.1	7.0	11.0
G-2	1.9	10.0	3.0	34.6	7.0	16.5
G-3	1.9	10.0	3.0	46.2	7.0	22.0
H-1	1.9	10.0	2.0	23.1	7.0	11.0
H-2	1.9	10.0	2.0	34.6	7.0	16.5
H-3	1.9	10.0	2.0	46.2	7.0	22.0
I-1	1.9	10.0	3.0	23.1	7.0	11.0
I-2	1.9	10.0	3.0	34.6	7.0	16.5
I-3	1.9	10.0	3.0	46.2	7.0	22.0

図 2.3 に、仲敷ら (1996) が提示した単管から放水された噴流の拡散形態と放水口の底面からの高さ、放水口での内部フルード数の関係を示す。ここに、図中の点線は、噴流が底面の影響を受けて浮上しにくくなる条件と、影響を受けずに水平密度噴流として拡散する条件の境界を示しており、次式で表される。

$$H/d \geq 0.005 \times \text{Fr}^2 \quad (2.1)$$

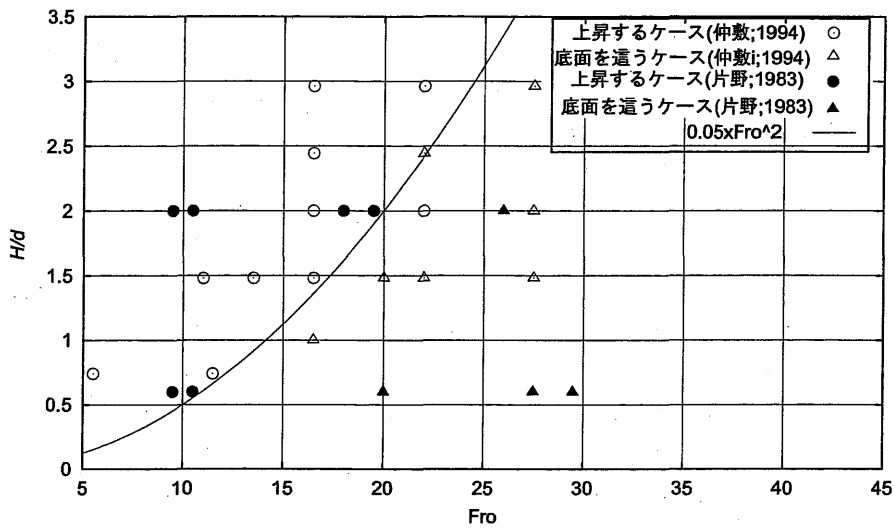


図 2.3 単管からの密度噴流の経路パターン (仲敷ら,1996)

この式は、内部フルード数が小さい場合および底面から放水口の高さが小さい場合に、放水直後の噴流が浮上し、逆の場合では噴流が浮上しにくくなることを表しており、右辺の値よりも設置水深が大きくなると、噴流が浮上経路となることを意味する。

複数管から放水された噴流についても、測定した水温を用いて、仲敷らと同様の解析を行った。図 2.4 の (1) から (3) に、放水管間隔 D/d を変えた場合の複数管から放水された噴流の拡散パターンを示す。ここに、噴流の軌跡をサーミスタの水温計の値から求め、その軌跡の違いにより、噴流が浮上し密度噴流として拡散する場合を●、噴流が底面に近くを這うように拡散する場合を△、および噴流がほぼ直進経路で拡散する●と△との中間である場合を*で示した。

複数管から放水する場合においても、単管から放水される場合と同様に、放水流速が大きい、すなわちフルード数が大きい場合、および放水口の底面からの高さが小さな場合に、噴流が底面近くを這うように拡散する条件となる。しかし、放水口間隔が小さい条件となるケース A-2, B-2, C-3 では、単管では放水直後に浮上する条件となるにもかかわらず、放水直後に噴流は浮上せず、直進経路や底面を這うように拡散する。このような結果から、噴流が浮上するパターンと浮上せずに底面近くを直進するパターンの放水条件の境界は、放水口の間隔 D が十分広い場合 ($D/d=10$) では単管とほぼ同じとなるが、放水間隔 D が $D/d=7.5, 5$ のように小さくなると、左斜め上側に移動する。この結果は、複管からの噴流がそれぞれ、相互作用することにより、流速の低減率や連行量が抑制されたためと考えられる。

以上の結果から、複管から放水される場合の条件は、式 (2.1) に放水口の間隔 (D) に依存する項を追加し、以下の式を提案する。

$$H/d \geq 0.05 \times Fro^2 \times (\min(D/d, 10))^{-1} \quad (2.2)$$

この式 (2.2) は、図 2.4 の点線を示しており、噴流が浮上するパターンと浮上せずに拡散するパターンの条件の境界とほぼ一致していることが分かる。

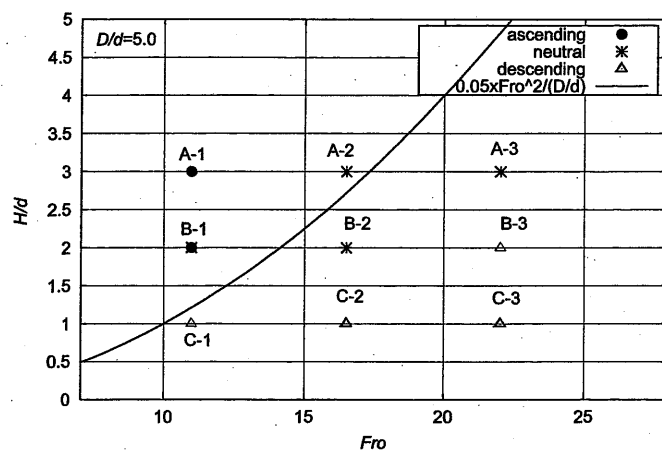
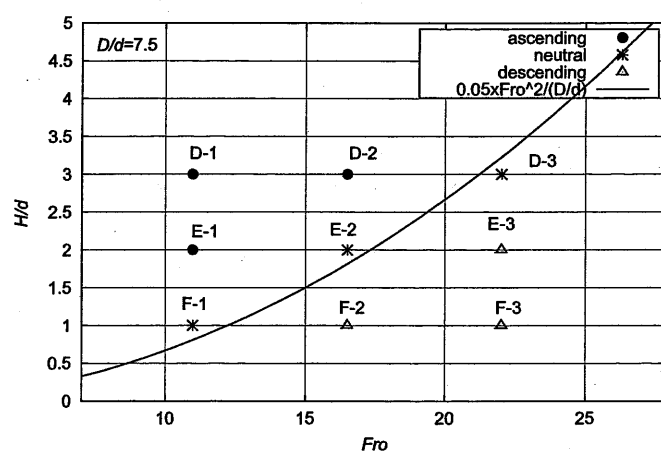
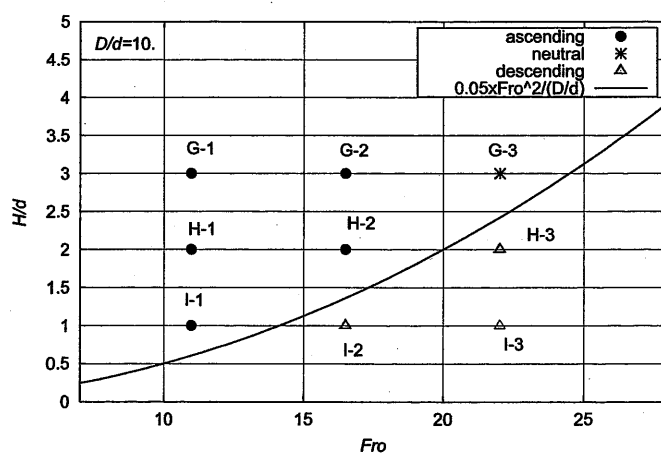
(1) $D/d=5.0$ (2) $D/d=7.5$ (3) $D/d=10.0$

図 2.4 複管からの密度噴流の経路パターン

表 2.2 実験条件 2

実験 ケース	放水 管数	放水管の 高さ H/d	放水管間 隔 D/d	放水流速 U_o (cm/s)	内部フルー ド数 Fro
case1	2	3	5	23.3	11.0
case2	2	2	5	46.2	22.0
case3	2	3	7.5	23.3	11.0
case4	2	3	7.5	46.2	22.0

表 2.3 流速・水温の測定点

実験ケース	x/d	y/d	z/d
case1	0.79	2.5	$\pm 0.74, \pm 0.63, \pm 0.53, \pm 0.42, \pm 0.32, \pm 0.21, \pm 0.11, 0.0$
	5.,10.,15.,20,30.	0.,0.53,1.05,1.58,2.11,2.5	$\pm 1.58, \pm 1.05, \pm 0.53, 0.0$
	40.	0.	2.11,2.63,3.16,3.68,4.21,4.74,5.26
case2	5.,10.,15., 20.,30.,40.	0.,0.53,1.05, 1.58,2.11,2.5	-0.84, ± 0.53 ,1.05,1.58,2.11 2.63,3.16,3.68,4.21,4.74,5.26
	1.00	3.75	$\pm 0.74, \pm 0.63, \pm 0.53, \pm 0.42, \pm 0.32, \pm 0.21, \pm 0.11, 0.0$
case3	5.,10.,15., 20.,30.	0.,1.,2., 3.,3.75	$\pm 1.58, \pm 1.05, \pm 0.53, 0.0$ 2.11,2.63,3.16,3.68,4.21,4.74,5.26
	1.00	3.75	$\pm 0.74, \pm 0.63, \pm 0.53, \pm 0.42, \pm 0.32, \pm 0.21, \pm 0.11, 0.0$
case4	5.,10.,15., 20.,30.	0.,1.,2., 3.,3.75	-0.84, ± 0.53 ,1.05,1.58,2.11 2.63,3.16,3.68,4.21,4.74,5.26
	1.00	3.75	$\pm 0.74, \pm 0.63, \pm 0.53, \pm 0.42, \pm 0.32, \pm 0.21, \pm 0.11, 0.0$

(2) 噴流内での流速・水温の拡散特性

前項での実験結果から、複管から水平に放水される密度噴流は、単管の場合と同様に放出条件によって、浮上するパターンと、浮上せずに底面付近で拡散・希釈するパターンに分けられる。本項では、噴流内の拡散過程をより詳細に検討するため、両パターンの代表的なケースである A-1,A-3,D-1,D-3 の合計 4 ケースについて、流速・水温の同時測定を行った。

表 2.2 に、4 ケースの実験条件を示す。表 2.3 に測点の位置、および図 2.5 に例として case1 の実験の測定点の位置を示す。4 ケースの実験では、放水口近傍の噴流の運動量が卓越する領域について計測することを目的とし、図中の点のように、鉛直断面および水平断面において流速水温の同時測定を行った。

表 2.4 に主な記号を示す。また、図 2.6 に記号の概略図を示す。放水方向 x の各横断面 $y-z$ において、上昇水温および流速の最大値を T_{max}, U_{max} と称し、放水口前面での各最大値を T_m, U_m とした。また、 T_m, U_m の鉛直方向の最大値の位置を z_{mt}, u_{mt} とした。

■鉛直方向の希釈・拡散特性 放水口の中心軸 ($y/d=2.5$) を通る鉛直断面での噴流の鉛直分布について検討を行う。放水口の中心軸を通る鉛直断面上の各ライン (計測を行った $x/d = 5, 10, 15, 20, 30, 40$) において、流速 U_m 、上昇水温の最大値 T_m およびその位置 z_{mt}/d の検討を行った。

図 2.7 に水温の最大値 T_m とその位置 z_{mt} を示し、図 2.8 に流速の最大値 U_m とその位置 z_{mu} を示す。片野 (1983) は、単管から放水される水平密度噴流に関する水理実験結果から、底面の影響が小さく噴流が浮上するパターンでの放水口軸上の噴流の経路 (各鉛直断面での水温の最大値の位置 z_{mt}/d) が、

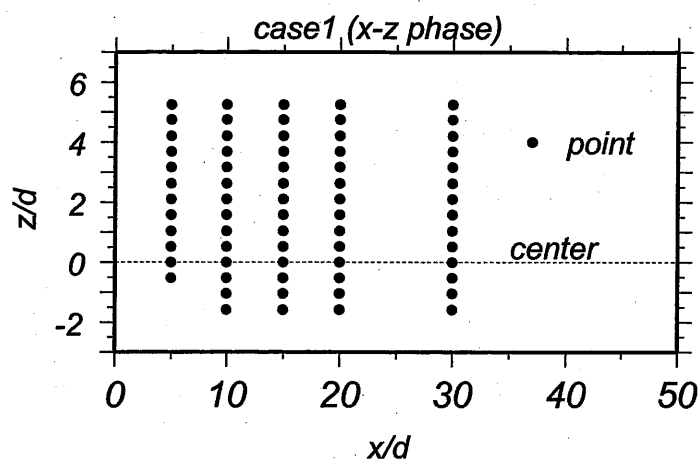


図 2.5 case1 の測定点の位置

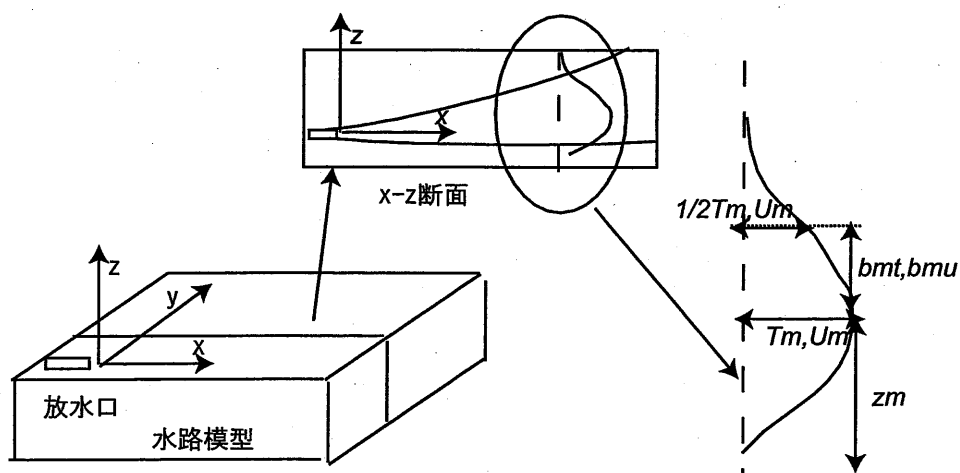


図 2.6 放水口中心軸上での記号の模式図

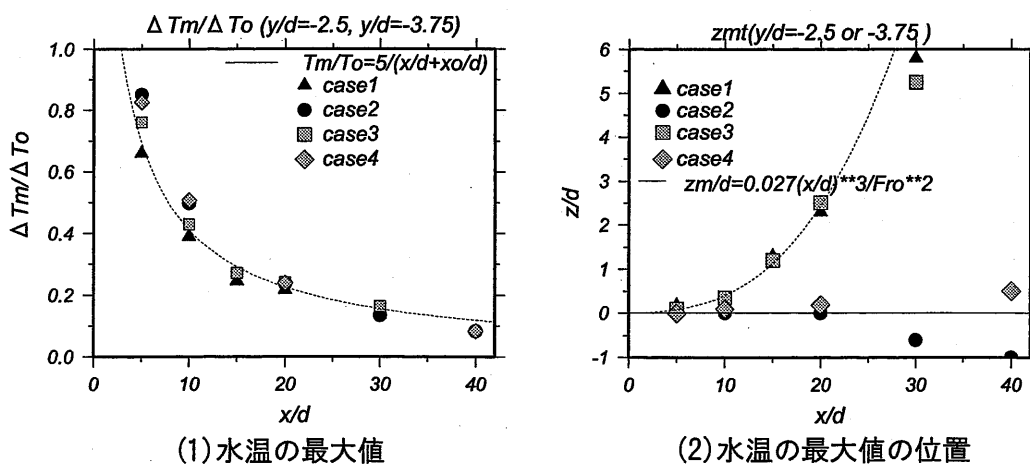
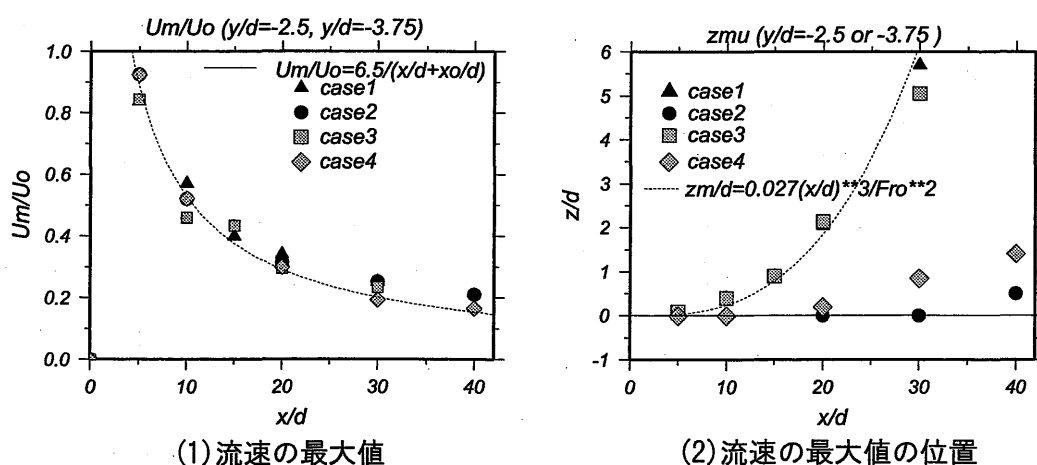
図 2.7 水温の最大値 T_m とその位置 z_{mt}

表 2.4 本章の主な記号

\tilde{u}	:	測定された流速 ($\tilde{u} = U + u$)
\tilde{t}	:	測定された水温 ($\tilde{t} = T + t$)
U, u	:	時間平均流速, 流速の変動量
T, t	:	時間平均水温, 水温の変動量
U_o, T_o, T_e	:	放水流速, 放水水温, 環境水温
ΔT_o	:	放水する上昇水温 $\Delta T_o = T_o - T_e$
ΔT	:	放水する上昇水温 $\Delta T = T - T_e$
ΔT	:	放水する上昇水温 $\Delta T = T - T_e$
u^2	:	流速の変動強度の時間平均
t^2	:	水温の変動強度の時間平均
b	:	鉛直方向の半値幅 (添え字 u ; 流速, t ; 水温)
f	:	正規分布の関数
U_{max}, T_{max}	:	ある位置 x/d の断面の流速, 水温の最大値
U_m, T_m	:	位置 $y/d=2.5$ の断面の流速, 水温の最大値
z_{mu}, z_{mt}	:	位置 $y/d=2.5$ の断面の流速, 水温の最大値の位置 z/d

図 2.8 流速の最大値 U_m とその位置 z_{mu}

以下のように流下方向の距離の 3 乗に比例し, 内部フルード数の 2 乗に逆比例することを示している.

$$z/d = a \times (x/d)^3 \times Fro^{-2} \quad (2.3)$$

ここに, a は係数, x/d は放水口の管径に対する放水方向の距離, Fro は内部フルード数である. また, 仲敷ら (1996) も, 放水口の底面の高さを変えて同様な実験を行っており, 噴流の経路が, 式 (2.3) となることをあらためて示し, 式 (2.3) の係数 a が底面の影響により変わることを示している.

係数の値は, 片野 (1983) の研究では 0.0493, 仲敷ら (1996) の研究では, 底面の条件により異なるが, 約 0.0081~としている. 本実験での浮上するケース (case1, case3) での経路も式 (2.3) とほぼ一致し, こ

の式の係数 a は 0.027 となり、両研究での係数と同程度のオーダーとなった。

次元解析により噴流の低減率は、流下方向の距離に反比例することが知られている [野村,1980]。また、片野や石崎 (1981a), (1981b), 石崎 (1982) は、実験結果から、単管からの密度噴流における流下方向での流速や水温の低減は、流下方向の距離に反比例するとして、次式を提案している。

$$Um/Uo = \alpha_1/(x/d + x_o/d) \quad (2.4)$$

$$Tm/To = \alpha_2/(x/d + x_o/d) \quad (2.5)$$

ここに、 α は係数、 x_o/d は仮想原点の位置である。

本実験においても、この式 (2.4), (2.5) を適用した。図 2.7, 2.8 上の線は、式 (2.4), (2.5) において、 α_1, α_2 を 6.5, 5.0, x_o/d を 2.2 とした値を示している。本実験の流速・水温では、ほぼ式 (2.4), (2.5) に沿って低減している。ただし、case2,4 の水温低減率では、case1,3 と比べて、小さくなっており、水温低減率は、放水直後の経路によって異なる結果を示した。これは、放水直後に浮上せず、直進経路をとる case2,4 では、浮上する case1,3 と異なり、噴流の上側からしか環境水を連行することができないため、水温の低減率が小さくなると考えられる。流速での低減率では、水温の低減率ほど経路に依存する傾向を示していないが、これは、連行以外に底面の摩擦の影響によるためと考えられる。

■放水口中心軸上での流速・水温の鉛直分布 本研究で対象とする水平密度噴流では、放水口での浮力に比べ運動量が卓越している ($Fro=11\sim22$) ため、放出された噴流の経路は $x/d=10$ 程度まではほぼ底面に平行である。また、本実験では水深が浅いため浮上経路の曲率が小さく、流速・水温の分布形は相似形になると考えられる。そこで、本実験の結果のうち、放水口前面の各鉛直分布について、図 2.6 に示すような流速水温の最大値の位置から半値までの距離、半値半幅 bu, bt を求めた。ただし、半値半幅は、浮上するケース (case1,3) では各平均量の最大値の位置より鉛直方向下側で、放水直後に浮上しないケース (case2,4) では各平均量の最大値の位置より鉛直方向上側で定義した。

図 2.9(1), (2) に、各鉛直断面での流速・水温の最大値の位置から半値までの距離 (bu, bt : 半値半幅) を示す。半値半幅の値は、軸対称噴流の場合でよく知られている、以下の式に示すように流下距離に比例して増加していることが分かる [野村,1980; 石崎,1981a;]。

$$bu = \beta_1 \times (x/d + x_o/d) \quad (2.6)$$

$$bt = \beta_2 \times (x/d + x_o/d) \quad (2.7)$$

ここに、 x_o/d は式 (2.4), (2.5) と同じ値で、 β_1, β_2 は係数である。図中の線は、式 (2.6), (2.7) の係数を、 $\beta_1 \{=0.095 \text{ (case1,3)}, 0.086 \text{ (case2,4)}\}$, $\beta_2 \{=0.105 \text{ (case1,3)}, 0.090 \text{ (case2,4)}\}$ とした結果を表示しており、鉛直方向に放水された密度噴流の結果をまとめた石崎 (1981b) と同程度の結果となっている。

浮上するケース (case1,3) と浮上しないケース (case2,4) では若干係数が違っているが、これは、半値幅を鉛直距離で読み取ったことから、浮上するケースのように経路が曲がると、半値幅を若干大きく見積もるため、および放水直後に浮上しないケースでは底面の影響により周囲水の連行が抑制され、浮上するケースに比べ、半値半幅の発達の度合いが小さくなったためと考えられる。

図 2.10, 図 2.11 に、各鉛直断面における流速・水温の値を最大値および半値半幅を用いる慣用的な方法 [椿および小松,1978; 石崎,1981a; Chu et al.,1999] で無次元化し、その最大値の位置を経路で補正した鉛直分布を示す。ここに、図中の点線は、以下の式で示すガウス誤差曲線を表している。

$$U/U_m = \exp[-(\ln 2)\{(z - z_{mu})/bu\}^2] \quad (2.8)$$

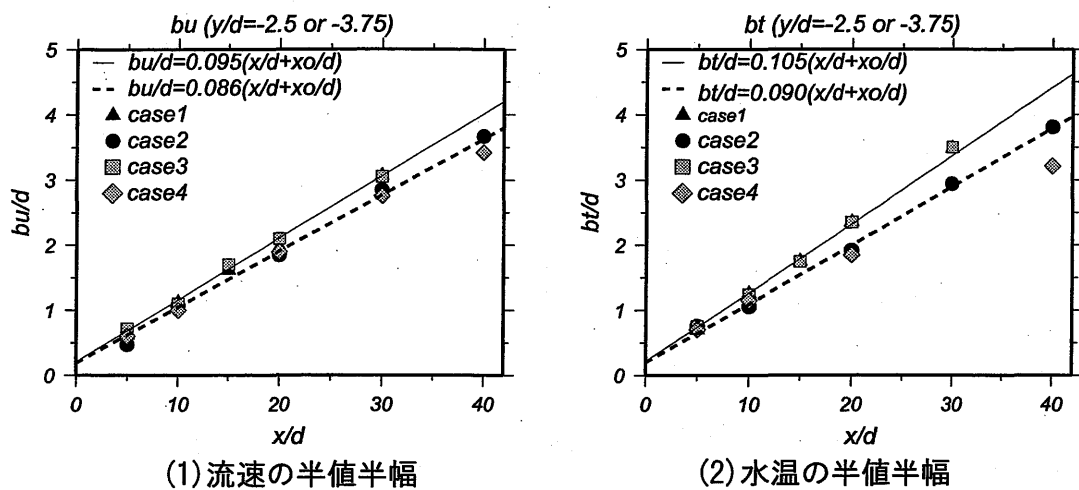


図 2.9 半値半幅の結果

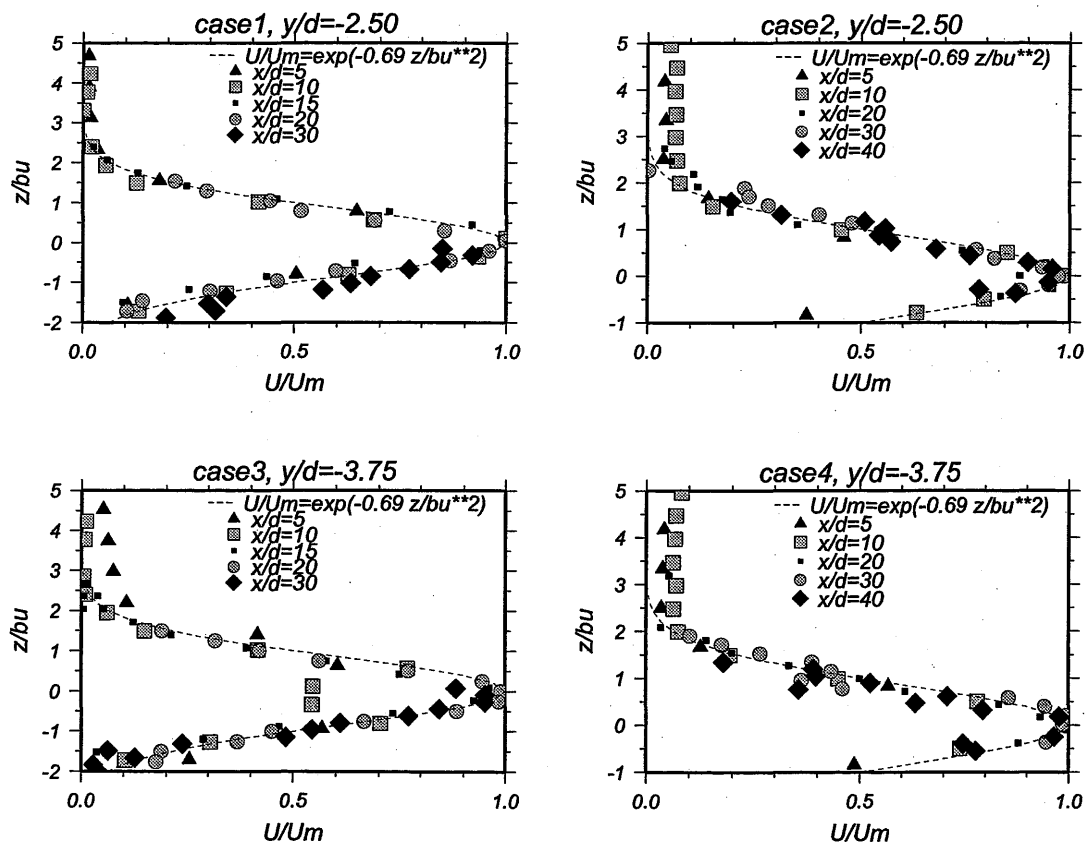


図 2.10 流速の鉛直分布 (放水口軸上)

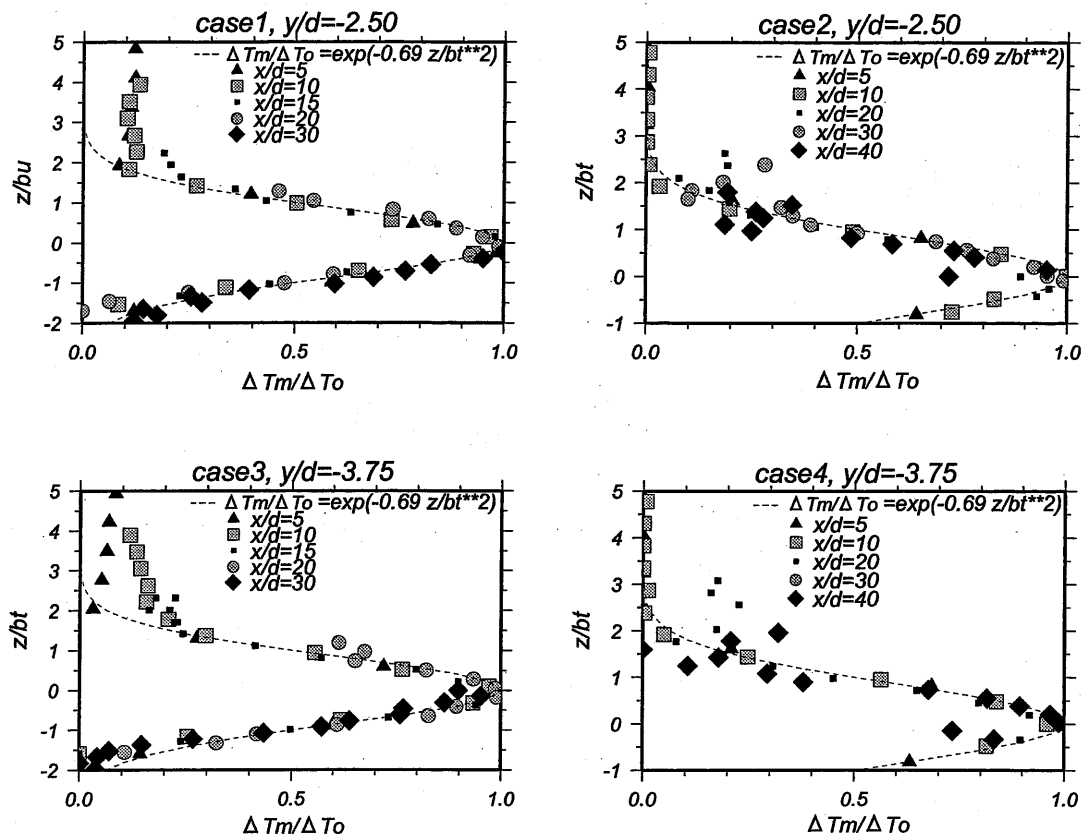


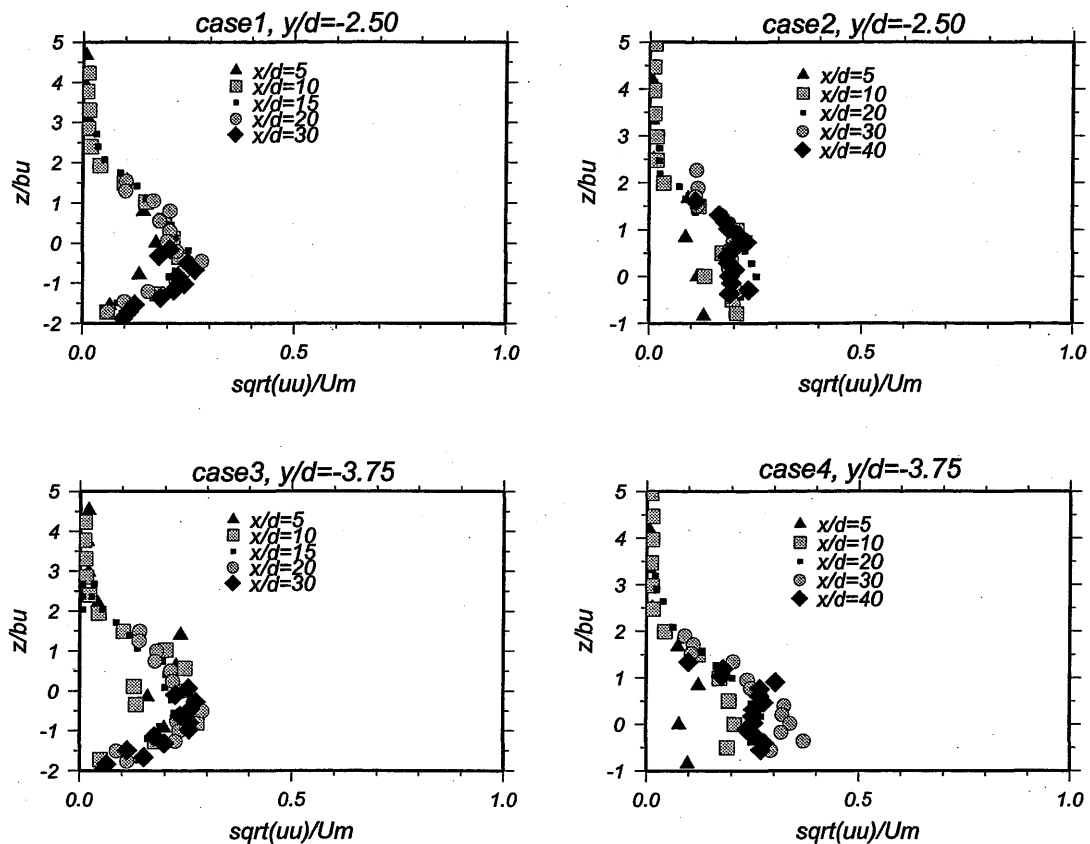
図 2.11 水温の鉛直分布 (放水口軸上)

$$T/T_m = \exp[-(\ln 2)\{(z - z_{mt})/bt\}^2] \quad (2.9)$$

各ケースの水温・流速の鉛直分布は、噴流が放水されて発達した分布に似たガウス分布と同様の分布となり、噴流の特徴である相似な形状となった [例えば、野村,1980 等]。また、この相似な分布形状は、浮上するケースおよび直進するケースともにほぼ同様な分布形状をとり、無次元化した鉛直分布が浮上経路によらない結果となった。

図 2.12, 図 2.13 に、流速および水温の変動量 uu, tt について無次元化した鉛直分布を示す。各ケースの流速および水温の変動量の値は、Davidson and Pun (1999) が行った鉛直に放水する噴流の実験結果や、室田ら (1989) が行った鉛直に放水する密度噴流の実験と同様に、半値幅の範囲内において平均量の約 20~30 % となった。また、変動量の分布形状も、Davidson や室田らと同様に噴流の中心で小さく端で大きくなるような双頭形の分布となる。しかし、浮上しないケース (case2,4) では、底面により連行が抑制されるため、噴流内の変動量の分布は、鉛直方向に一樣になるのにたいし、噴流が浮上するケース (case1,3) では、下方からの連行が卓越するため、流速・水温の変動量とも下側の方が大きくなり、噴流の経路の違いで、case1,3 と case2,4 で分布形状が異なる結果となった。

浮上しないケース (case2,4) での水温変動は、流下するにつれて大きくなり、 $x/d=40$ 付近より急激に増加する。これは、流下方向の運動量は底面の影響を受けて低減するが、水温は連行が抑制されているため低減しにくいことから、相対的に浮力の効果が大きくなったため、変動量が大きくなったためと考える。

図 2.12 流速の変動量 uu の鉛直分布 (放水口軸上)

■水平方向の希釈・拡散特性 2 放水口から放水される噴流は、浮力や底面の影響以外に、水平方向において、2つの噴流間で希釈・連行が抑制されることが予想され、流速や水温の平均量の最大値の位置は、流下するに連れて3次元的に変化することが予想される。そこで、各横断面について流速・水温の最大値を求め、この低減率および位置について検討を行った。図 2.14(1) に $x-y$ 平面図での噴流の経路、ついで図 2.14(2) に $x-z$ 平面での噴流の経路を示す。ここに、計測を行った $x/d = 5, 10, 15, 20, 30, 40$ の断面における上昇水温の最大値の位置を噴流の経路とし、その位置を $x-y$ および $x-z$ 平面に投射した結果を示す。

case1,2,4 での $x-y$ 平面上での経路を見ると、温度の最大値は、流下するにつれて2つの放水口を中心方向に移動する。これは、2つの噴流の内側では連行・希釈が抑制され、主に2管の外側から連行・希釈が行われるためと考えられる。ただし、case3 では放水流速が弱く、放水口間の間隔が case1, case2 に比べて大きいから、2つの噴流が相互干渉しにくいことから、温度の最大値の位置は各放水口の中心軸上に位置したままとなっている。

鉛直方向の経路は、放水口軸上の経路と同様に、case1,3 では放水直後に浮上する経路、および case2,4 では直進する経路となる。

以上の結果から、放水口間隔が狭く、放水流速が小さい、および放水口の底面からの高さが大きい条件の case1 のような場合、噴流の経路は3次元となることが分かる。

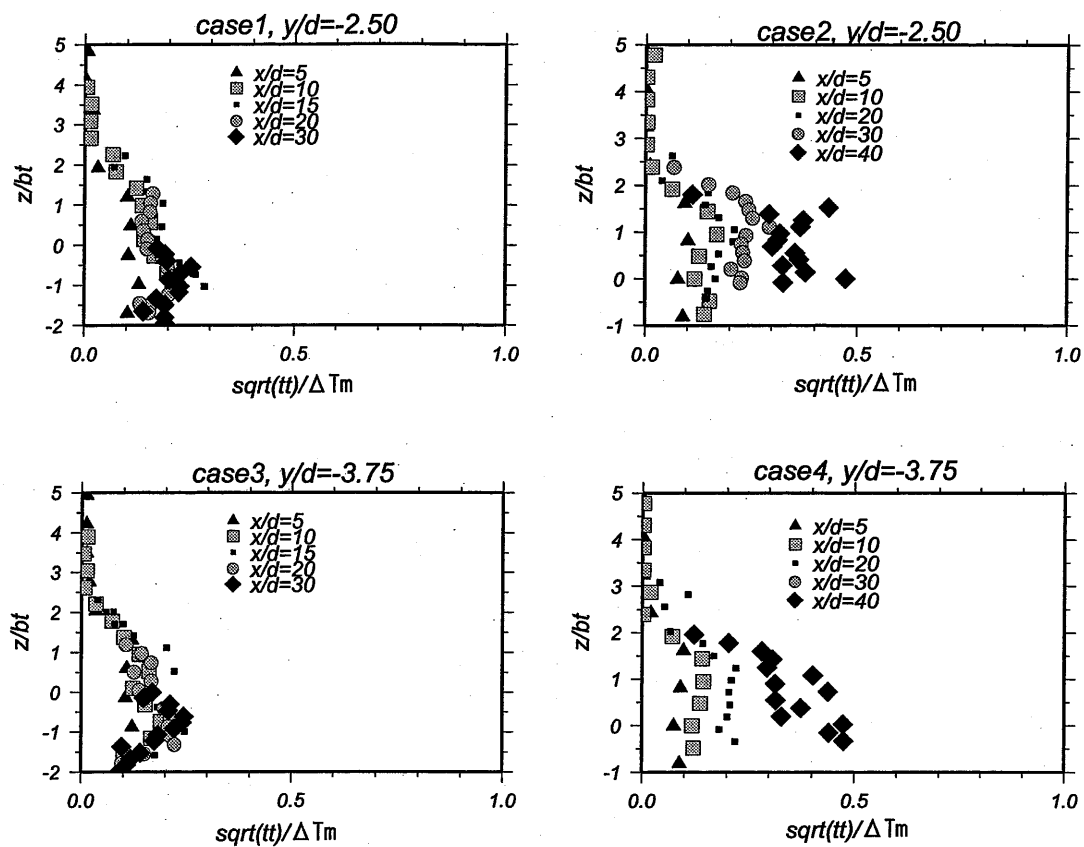
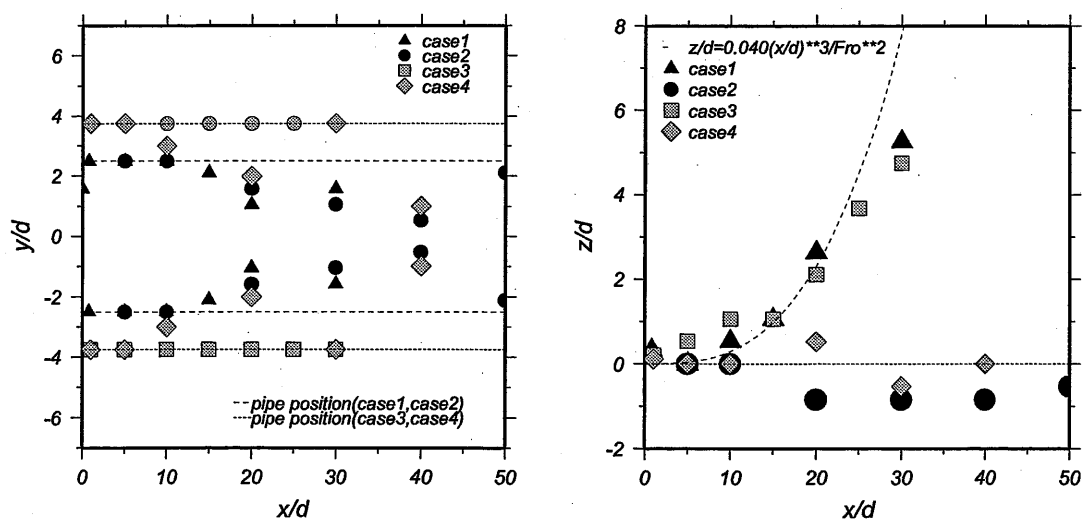
図 2.13 水温の変動量 tt の鉛直分布 (放水口軸上)

図 2.14 噴流の経路

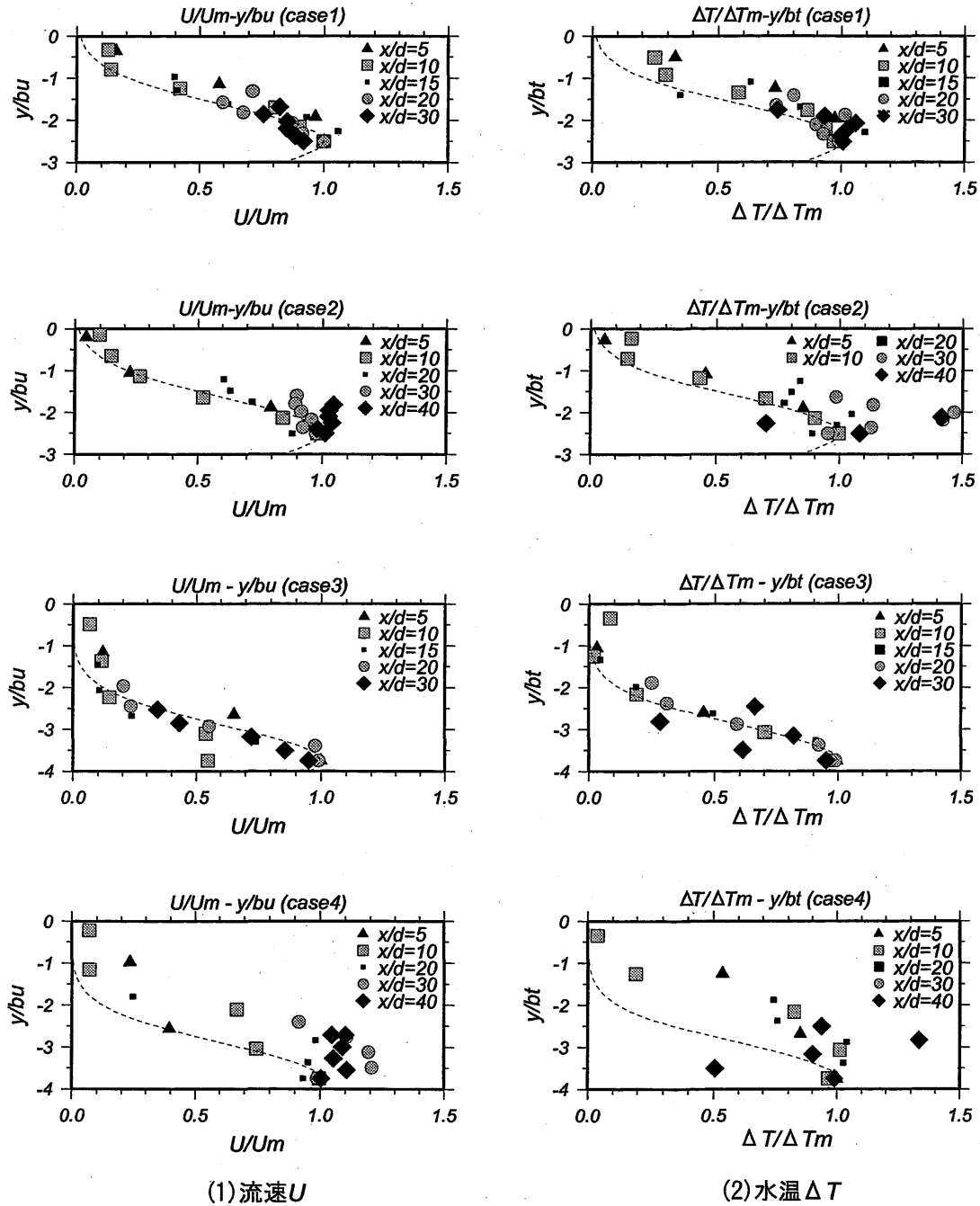


図 2.15 流速・水温の平均量の水平分布

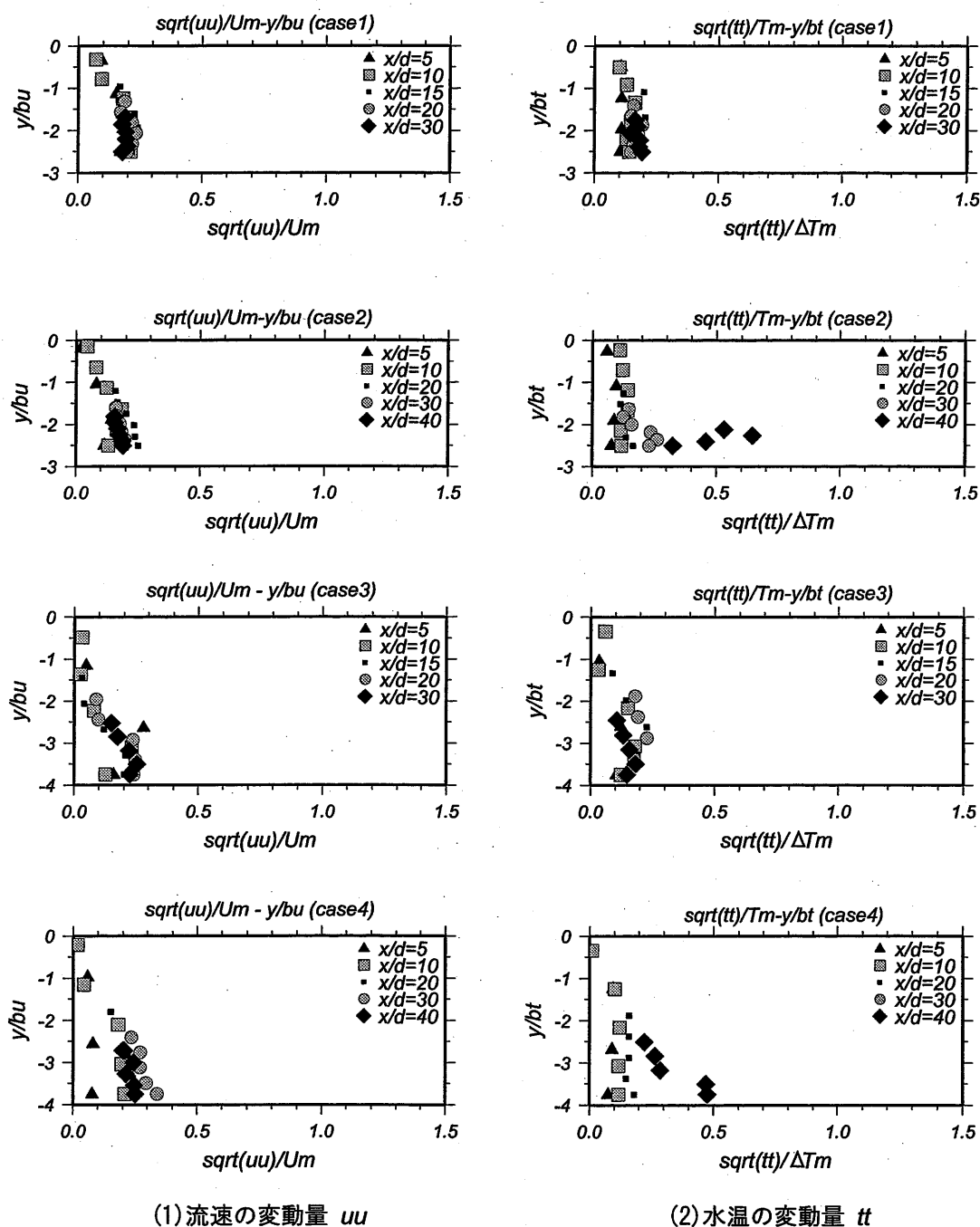


図 2.16 流速・水温の変動量の水平分布

図 2.15(1),(2) に、最大値および図 2.9 の半値半幅を用いて無次元化した流速・水温の水平分布を示す。

複数管から放水されるにも関わらず、放水口間隔が大きいことから、噴流の経路が放水口の前面にとどまる case3 では、鉛直分布と同様に水平分布もほぼ Gauss 分布の形状を示し、放水方向においても相似な分布形状となる。しかし、その他のケース case1,2,4 の流速、水温の分布では、相似な分布形を示さず、2 放水口の間で連行、希釈が抑制されるため、放水口からの流下距離が大きくなるに連れて 2 放水間で一様な値をもつ分布となる。この結果は、Pani and Dash (1983) の複数管からの噴流の実験でも示されており、本実験と同程度の放水口の間隔で、 $x/d = 30$ において、流速の分布は一様な分布となっている。

図 2.16(1),(2) に、流速および水温の変動量 uu, tt について無次元化した水平分布を示す。各ケースの流速および水温の変動量の最大値は、鉛直分布の結果と同様に平均量の 20~30 % となる。

各ケースの分布形状は、case3 を除き、放水口から離れるにつれて 2 つの噴流の間で一様な分布となっており、この影響により平均量の水平分布が一様になっていくと考えられる。ただし、平均量の水平方向の分布が一様となる位置、すなわち放水口から離れた位置では、各変動量の分布形状は、両噴流の内側よりも外側で若干大きくなっており、2 つの噴流の外側から低減、連行による影響を受けていると考えられる。

2.3 3 次元数値モデルの構築と水理実験結果への適用

水理実験により、水平方向に放出された密度噴流は、底面の影響の有無に応じて、密度噴流として浮上する場合と、底面付近を沿いながら拡散する場合があります。放水後の噴流の軌跡は 3 次元的となることが示された。このような結果から、水平方向に放出される密度噴流を数値的に計算するには、3 次元数値モデルが必要となる。

本節では、これらの拡散形態に対して 3 次元数値モデルを適用し、計算結果を 2.2 で述べた水理実験結果と比較を行うことにより、数値モデルの妥当性を検討する。

2.3.1 数値モデルの概要

水平方向の密度噴流では、運動方程式の鉛直方向の項が無視できないことから、水平方向に放水される密度噴流を静水圧近似した数値モデルにより計算した Kim ら (2001) と異なり、本研究では非静水圧の 3 次元数値モデルを構築した。

従来、噴流の計算には噴流断面の最大流速や半値半幅を用いて噴流内の渦動粘性係数や渦動拡散係数を推定する平均値モデルや準 3 次元モデルが多く用いられてきた [例えば、水鳥ら (1992)]。しかしながら、周囲流速や浮力の影響で噴流中心軸が曲がる場合や、複数管から放出された噴流が重合する領域では、その経路や分布形の半値半幅の定義することが難しく、適用が困難となる。仲敷ら (1996) は、単管から放出される水平密度噴流に対して、噴流断面の最大流速や半値半幅を用いず、乱れエネルギーやエネルギー散逸率から直接噴流内の渦動粘性係数や渦動拡散係数を推定する 2 方程式モデルである乱流モデル ($k-\epsilon$ モデル) を適用しており、本モデルにおいても、 $k-\epsilon$ モデルを用いる。

(1) 基礎方程式とその離散化

本研究では、流れの計算にレイノルズ方程式および連続式を、温度場の計算に熱量保存式を、乱流モデルに2方程式乱流モデル($k-\epsilon$ モデル [例えば, Chen ら, 1992; 数値流体力学編集委員 1995]) を、渦動粘性係数に k, ϵ より計算する渦粘性モデルを用いた。表 2.5 に、モデルを構成する基礎式を示す。

この表 2.5 で示した式について離散化し、3次元温排水拡散予測モデルを構築した。格子での各物理量の定義位置は、スタッガードで配置した。また、計算格子は可変メッシュを用いており、放水口近傍では細かいメッシュを、その他の領域では粗いメッシュを用いた。

表 2.6 に本モデル中で用いた方程式中の各項の離散化手法を示す。基礎式中の各項の空間差分については有限体積法により離散化を行い、運動方程式中、および他のスカラー量の移流項に TVD スキーム [藤井, 1994] を用いた。また、方程式中の拡散項の離散化には中央差分を用いた。そして、方程式中の時間項については、explicit に前進差分を用いて離散化した。

圧力の計算には HSMAC 法 [藤井, 1994] を用い、計算セル内の圧力場を修正することによって、流速場が連続式を満たすように補正を行った。HSMAC 法ではポアソン方程式を解かなければならないが、本モデルでは共役勾配法 (Conjugate Gradient 法: 以下 CG 法) を用いた。

(2) 計算条件

表 2.7 にメッシュ分割の緒元を示す。図 2.17 に計算メッシュ (水平断面、鉛直断面) の 1 例を示す。メッシュ幅は、放水口のメッシュを最小単位とし、 x, y, z 軸ともに原点から離れていくに連れて大きくなるようにした。実験で使用した放水口は円形であったが、本計算では直交座標を用いているため、計算上の放水口は実験のパイプと同じ面積をもつような 2×2 メッシュの正方形で、計算を行った。

計算に用いた時間ステップ (Δt) は、0.01sec とし、定常解が得られるまで 36,000 回の反復計算を行った。圧力を計算するための CG 法計算の収束条件としては、残差の二乗の合計が 0.1 以下になると、反復を打ち切る条件とした。

表 2.8 に計算領域各境界での境界条件を示す。開境界および壁の条件は、水理実験で用いた水槽と同じ条件とし、放水口の条件も水理実験と同じ条件とした。また、放水口の流速、水温は、水理実験条件と同じ条件で計算を行った。放水口における乱流量の境界条件、および放水口にそった壁における乱流量の境界条件は、仲敷ら (1996) の研究を参考にして設定した。

水面は壁面として固定端とし、水面に平行な流速についてはフリースリップ条件、鉛直方向の流速については 0 とし、流速計算および圧力の計算を行った。また、水面での温度、乱流量についてはノイマン条件とした。また、底面および側方の壁での境界条件は、流速をフリースリップ条件とし、境界の乱流量を 0 とした。また、水温については断熱条件とした。そして、放水方向にある開境界での速度および乱流量はノイマン条件を用いた。また開境界の水温は、流速が境界の外側に出ていくときにはノイマン条件、および内側に入ってくるときには環境水温に固定した。

初期条件は、水温を除く各変数を 0、水温を環境水温として、計算を開始した。また、放水流速も初期条件は 0 とし、計算開始後、時間に比例して水理実験での値まで増加させ、その後、各変数が定常となるまで計算を行った。

表 2.5 モデルを構成する基礎式

運動方程式	$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j}) - \beta(T - T_s)g_i$
連続式	$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$
熱量保存式	$\frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = +\frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha \frac{T}{\partial x_j} - \overline{\theta u_j}) + \frac{Q_1(T_e - T_s)}{C_p H \omega}$
乱れエネルギーの方程式	$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = +\frac{\partial}{\partial x_j} ((\nu_t + \nu) \frac{\partial k}{\partial x_j}) + P_k + P_b - \epsilon$
エネルギー逸散率の方程式	$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = +\frac{\partial}{\partial x_j} ((\nu_t + \nu) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \epsilon + C_{\epsilon 3} P_b)$
エネルギー生成項	$P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$
浮力によるエネルギー生産項	$P_b = \beta g_i \overline{\theta u_j}$
乱流量	$\begin{aligned} -\overline{u_i u_j} &= -\nu_t (\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}) - 2/3 \delta_{ij} k \\ -\overline{\theta u_j} &= -\alpha_i \frac{\partial T}{\partial x_j} \end{aligned}$
渦動粘性係数	$\nu_{tx,y} = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon}, \nu_{tz} = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} (1 + 3Ri)^{-1}$
渦動拡散係数	$\begin{aligned} \alpha_{x,y} &= \frac{1}{Pr_t} C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \alpha_{x,y} = \frac{1}{Pr_t} C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} (1 + 3Ri)^{-3} \\ Ri &= \begin{cases} -g \frac{\frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho (\frac{\partial U^2}{\partial z^2} + \frac{\partial V^2}{\partial z^2})} & \frac{\partial \rho}{\partial z} \geq 0.001 \\ 0 & \frac{\partial \rho}{\partial z} \leq 0.001 \end{cases} \end{aligned}$
各係数	$\begin{aligned} C_\mu &= 0.09, Pr_t = 0.7 \\ C_{\epsilon 1} &= 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, C_{\epsilon 3} = 1.4, \beta = \frac{\partial \rho}{\rho \partial T} = 0.00021 \end{aligned}$

ここに, U, u : 流速, T, θ : 水温, k : 乱れエネルギー, ϵ : 散逸率である。

2.3.2 計算結果と実験結果との比較

複数管から放水される噴流の拡散形態において, 噴流の各変数の低減・減衰, すなわち放水方向における流速・水温の値, および噴流の経路が重要となることから, これら噴流の経路および各変数の低減率について, 数値結果と実験結果との比較検討を行った。

表 2.6 離散化の概要

項目	3次元温排水拡散予測モデル
計算格子	可変メッシュ
圧力項	連続式を用い、HSMAC法により計算する。ポアソン方程式の計算にはICCG ¹⁾ 法を用いた。
物理量定義	スタaggerドメッシュ
時間方向離散化	Explicit
空間方向離散化	移流項：中心差分(運動方程式), TVD ²⁾ スキーム(その他の保存式)
	拡散項：中心差分

1) Incomplete Cholesky Gradient の略：逆行列やポアソン方程式等の反復解法の一つ

2) Total Variation Diminishing スキームの略：今回は1次と2次精度のスキームで構成される TVD スキームを用いた。

表 2.7 メッシュ分割の諸元

	メッシュ数	メッシュ幅	公比
x 方向	67	1.5cm~45.7cm	1.10
y 方向	66	0.8cm~26.5cm	1.0~1.15
z 方向	26	0.8cm~0.9cm	1.05

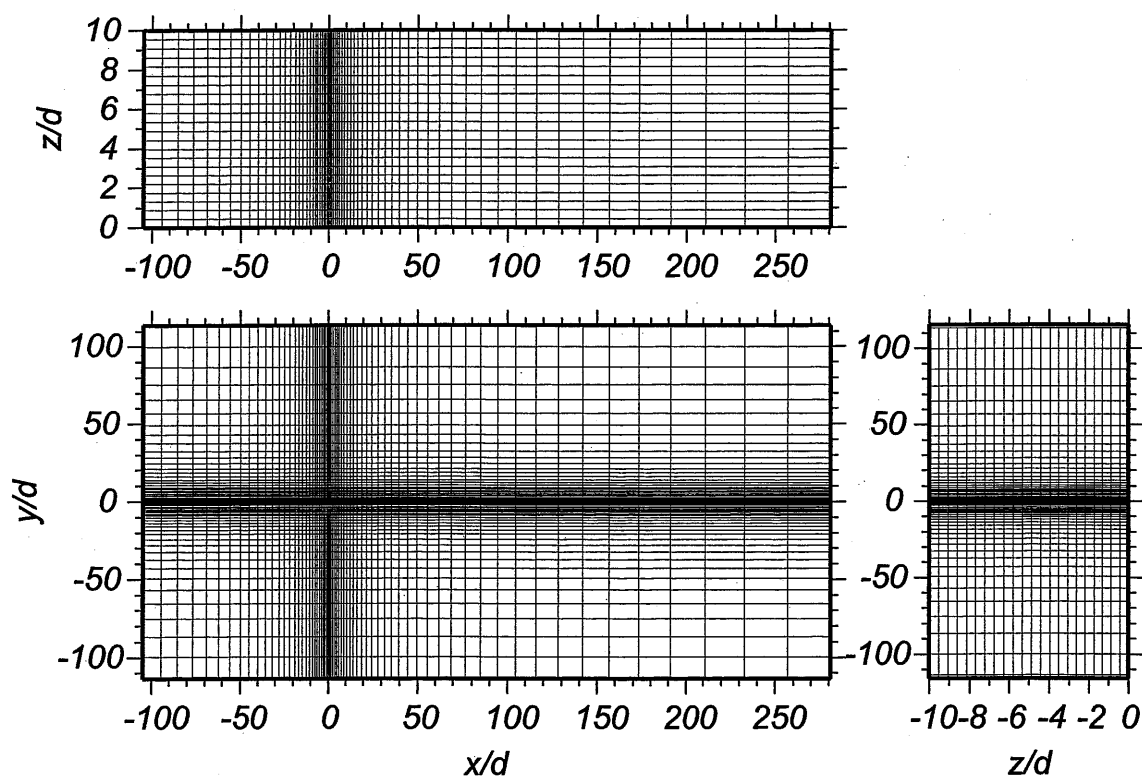


図 2.17 メッシュ形状

表 2.8 境界条件

各境界	各変数の条件
放水口	$U = U_0, T = T_0, k = 0.002U^2, \epsilon = C_\mu k^{3/2}/d; C_\mu = 0.09$
水面	水面：固定, 流速 u, v : ノイマン条件, 流速 $w: 0$ その他のスカラー量: ノイマン条件
底面および側面の境界条件	流速 u, v : フリースリップ条件, 流速 $w: 0$ $k = \epsilon = 0$: フリースリップ条件, 水温: 断熱条件
開境界条件	温度を除く全ての変数: ノイマン条件 水温 T : 流速が計算範囲から外に向かって正のとき, $\frac{\partial^2 T}{\partial n^2} = 0$: 流速が計算範囲から内に向かって正のとき, $T = T_e$

(1) 噴流の経路

図 2.18 に case1 の, 図 2.19 に case2 の, 図 2.20 に case3 の, 図 2.21 に case4 の, 上昇水温最大値の位置を $x-y$ 平面 (水平断面) および $x-z$ 平面 (流下方向断面) に投射した図を, および流速・水温の最大値を示す. 各図の (1) に水平断面に投射した水温の最大値の位置を, (2) に鉛直断面に投射した水温の最大値の位置を示す. また, 各図の (3) に, 流速の最大値の流下方向の減衰を, (4) に水温の最大値の流下方向の低減を示す.

数値計算で得られた噴流の水平方向の経路は, 実験結果と同様に, case4 では放水口前面を直進し, case1,2,3 では 2 噴流間において連行が抑制され, 流下するにつれて 2 放水口の内側に移動する結果となった. また, 数値計算で得られた鉛直方向の経路も, 実験結果同様に case1,3 では放水後すぐに浮上し, case2,4 では浮上せずに直進する結果となった. そして, 噴流が浮上する case1,3 では浮上し始める位置, およびその経路について, 計算結果と実験結果とよく一致し, 浮上しない case2,4 では, 計算結果が実験結果よりも底面に近い位置にあるが, 経路はほぼ一致した.

各ケースの放水方向における水温の低減や流速の減衰においても, 経路と同様に, 計算結果と実験結果と良く一致し, 本モデルの再現性は良好な結果となった.

(2) 水面に浮上するまでの水温分布の比較

各ケースの測定結果より, case1,2 では 2 放水口の間隔が狭く, 2 つの噴流の相互干渉の影響が顕著なことから, 本項以降における数値モデルの再現性の詳細な比較・検討には, case1,2 について行った.

図 2.22 に, 放水された噴流の水面付近に浮上するまでの水温分布について, 測定結果と計算結果を示す. 図のコンターは, 放水口軸中心の位置 ($y/d=0$.) での鉛直断面における放水水温により無次元化した値を示している. また, コンター間隔は 0.1 とした.

噴流が浮上するケース (case1) の結果では, 計算結果による, 放水口から浮上するまでのコンターの間隔, 浮上点の位置は, 実験結果と定性的に良く一致している. また, 噴流が浮上しないケース (case2) においても, 測定結果と計算結果は, 底面で遠いながら拡散する様子, およびそのコンター間隔について, ほぼ同様な結果となった.

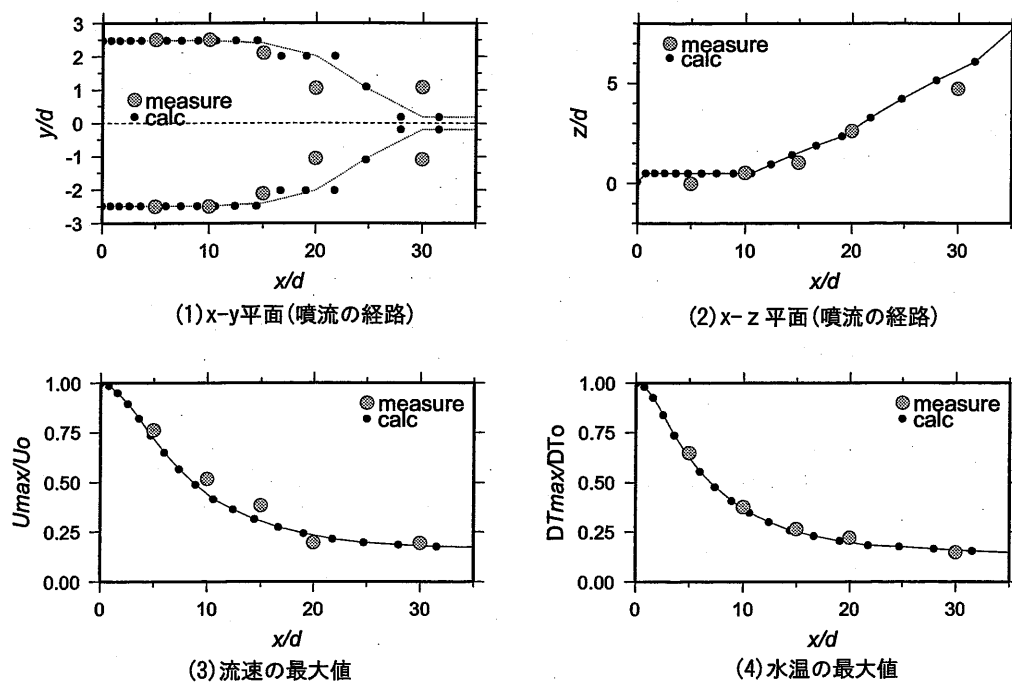


図 2.18 計算結果と実験結果との比較 (case1)

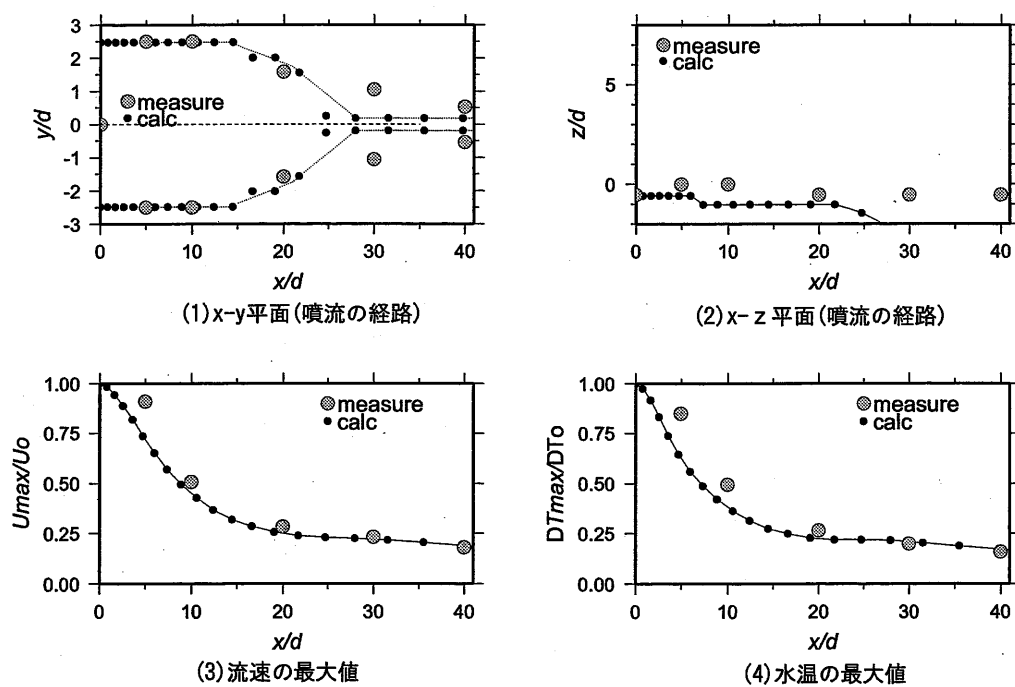


図 2.19 計算結果と実験結果との比較 (case2)

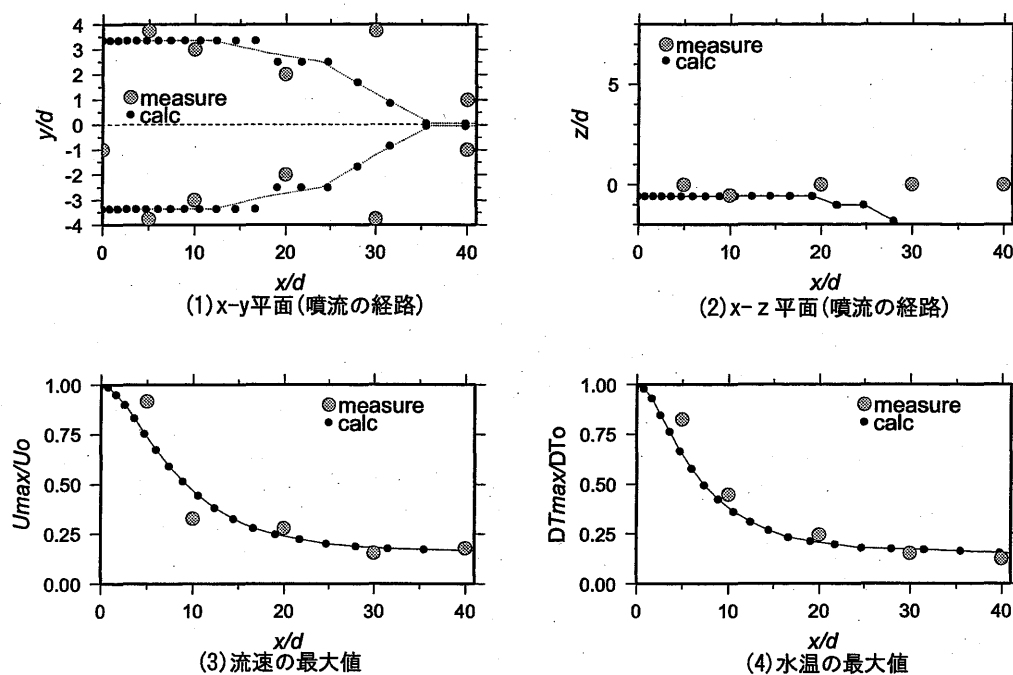


図 2.20 計算結果と実験結果との比較 (case3)

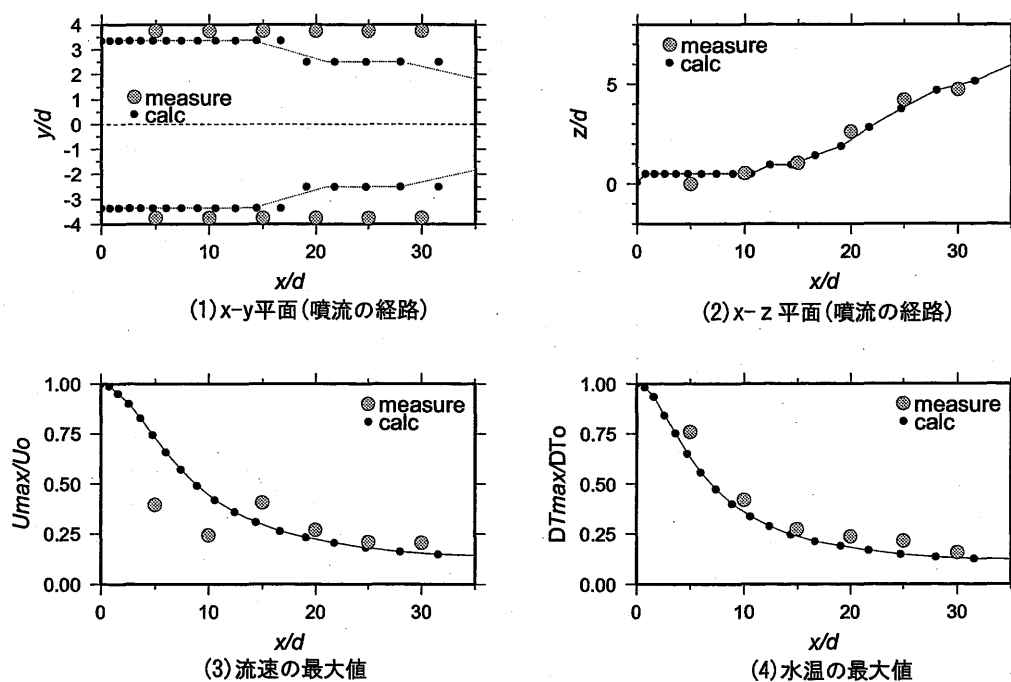


図 2.21 計算結果と実験結果との比較 (case4)

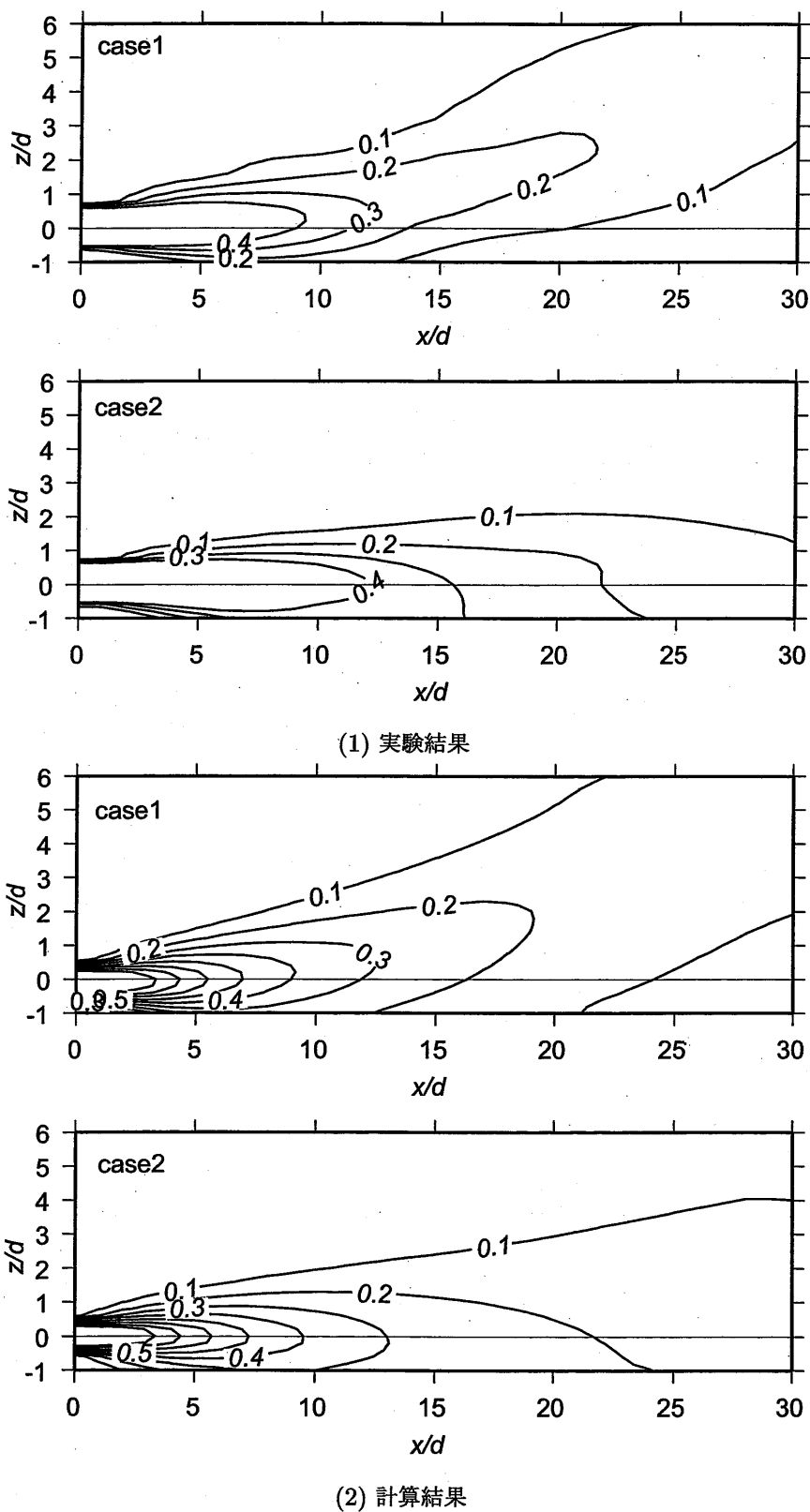


図 2.22 計算および実験で得られた放水口前面にける水温分布の比較

■水温・流速の水平分布および鉛直分布の比較 放水口前面での鉛直断面での水温結果では、計算結果と測定結果はよい一致を示した。しかし、複数管から放水される噴流は、3次元的に拡散しているため、計算結果と測定結果の定量的な比較検討には、放水口前面だけでなく、経路に沿った断面において実施する必要があると考えられる。そのため、水温の最大値の位置での水平および鉛直分布において、計算結果と測定結果の定量的な比較を行った。

図 2.23, 図 2.24 に、case1 の条件で得られた計算結果および実験結果の流速 U , 上昇水温 DT , 変動量 uu, tt の鉛直分布および水平分布を示す。また、図 2.25, 図 2.26 に、case2 の条件で得られた計算結果および実験結果の流速 U , 上昇水温 DT , 変動量 uu, tt の鉛直分布および水平分布を示す。

各図中の●は測定結果を、点線は計算結果を示す。また、各図中の鉛直分布は、流下距離 ($x/d=5, 10, 15$ (または 20)) での放水口中心軸上の断面の分布を示し、水平分布は、case1 については鉛直分布で水温の最大値の位置を通る水平断面、case2 については放水口中心軸を通る断面上の分布を示している。そして、各実験結果および計算結果における流速、水温の値は、放水流速および環境水温と放水水温の差を用いて無次元化した値を示している。

計算・実験結果における流速 U , 水温 T の鉛直分布および水平分布の比較より、計算結果が放水口近傍において実験結果よりも小さくなる傾向を示すものの、これ以降の放水方向に十分に離れた位置においては、噴流が水平密度噴流として希釈・拡散する case1, および放水口が底面に近く、噴流が底面近傍で希釈・拡散していく case2 の両ケースともに、計算結果は測定結果と定量的に同程度の分布、値となった。

変動量 tt の分布では、放水口に近い噴流の発達領域 ($x/d=5, 10$) において、計算結果が実験結果よりも若干大きくなる傾向を示すが、その他の分布では、両ケースおよび各変動量 uu, tt ともに計算結果は実験結果とよく一致し、分布についても同じ形状となった。

実験結果および計算結果の比較が良好であることから、複数管から水平放水される温排水の噴流間の相互作用や底面による拡散・希釈の抑制について、本研究で構築した 3 次元数値モデルにより再現できると考えられる。さらに、放水初期の温排水の経路が底面近くとなると、上昇水温の低減悪化だけでなく海底が掘れる等の問題があり、放水口条件の検討が必要なるが、本数値モデルの再現性が良好であったことから、温排水拡散予測だけでなく放水口条件の検討にも本モデルによる検討が可能であると考えられる。

2.3.3 計算結果の考察

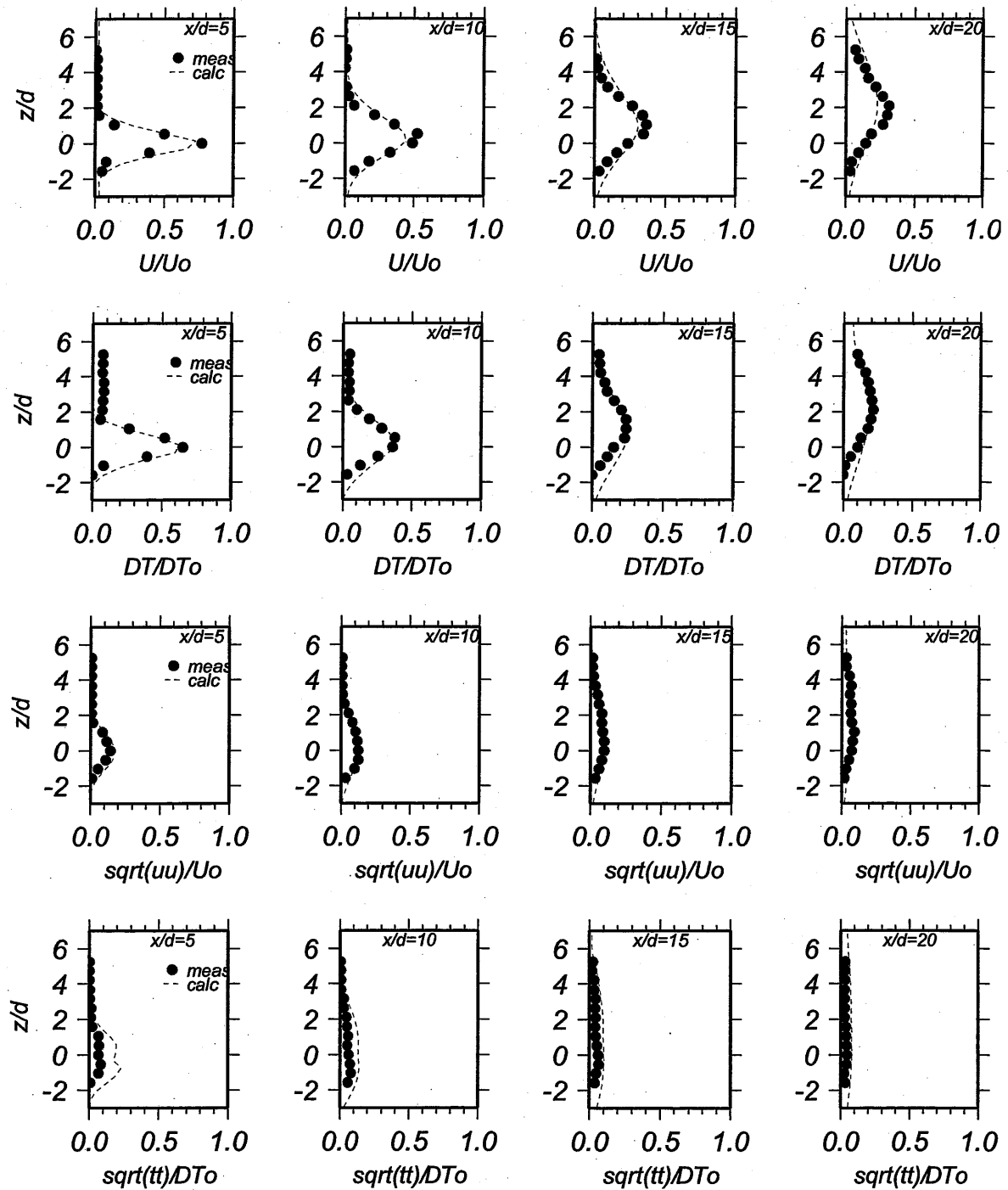
以降において、複数管から放水された噴流の経路・拡散挙動について、数値解析結果の検討を行う。

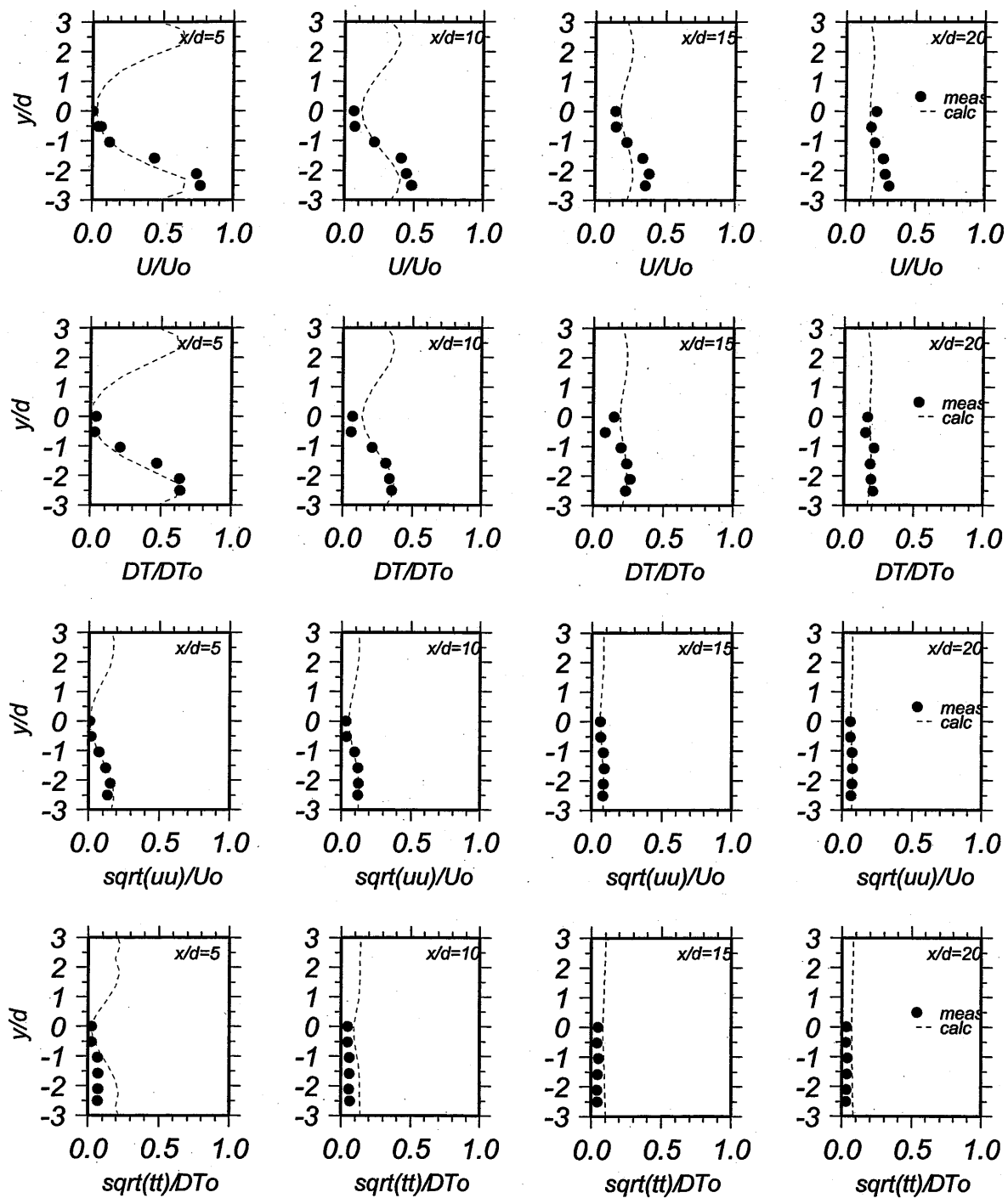
(1) 噴流の経路と流速・水温の低減

図 2.27 に、各実験ケースにおける噴流の水平、鉛直経路の比較、および各実験ケースにおける流下方向の流速の減衰、上昇水温の低減の比較を示す。図中の (3), (4) は、比較を容易にするために、図 2.18 の低減と分母と分子を取りかえた値を示している。

放水された噴流は初期の放水の運動量が卓越するため、 $x/d = 15 \sim 20$ まで噴流の通減 [片野, 1983; Rajaratnam, 1980] と同様に、各ケースの流速および水温ともに同程度に減衰している。また、各ケースの経路も水平・鉛直ともに直進している様子が分かる。

case3 は、2 放水管の間が十分に大きいために水平経路では直進し、噴流同士が相互干渉することが少

図 2.23 計算および実験で得られた流速 U , 上昇水温 DT , 変動量 uu, tt の鉛直分布 (case1)

図 2.24 計算および実験で得られた流速 U , 上昇水温 DT , 変動量 uu, tt の水平分布 (case1)

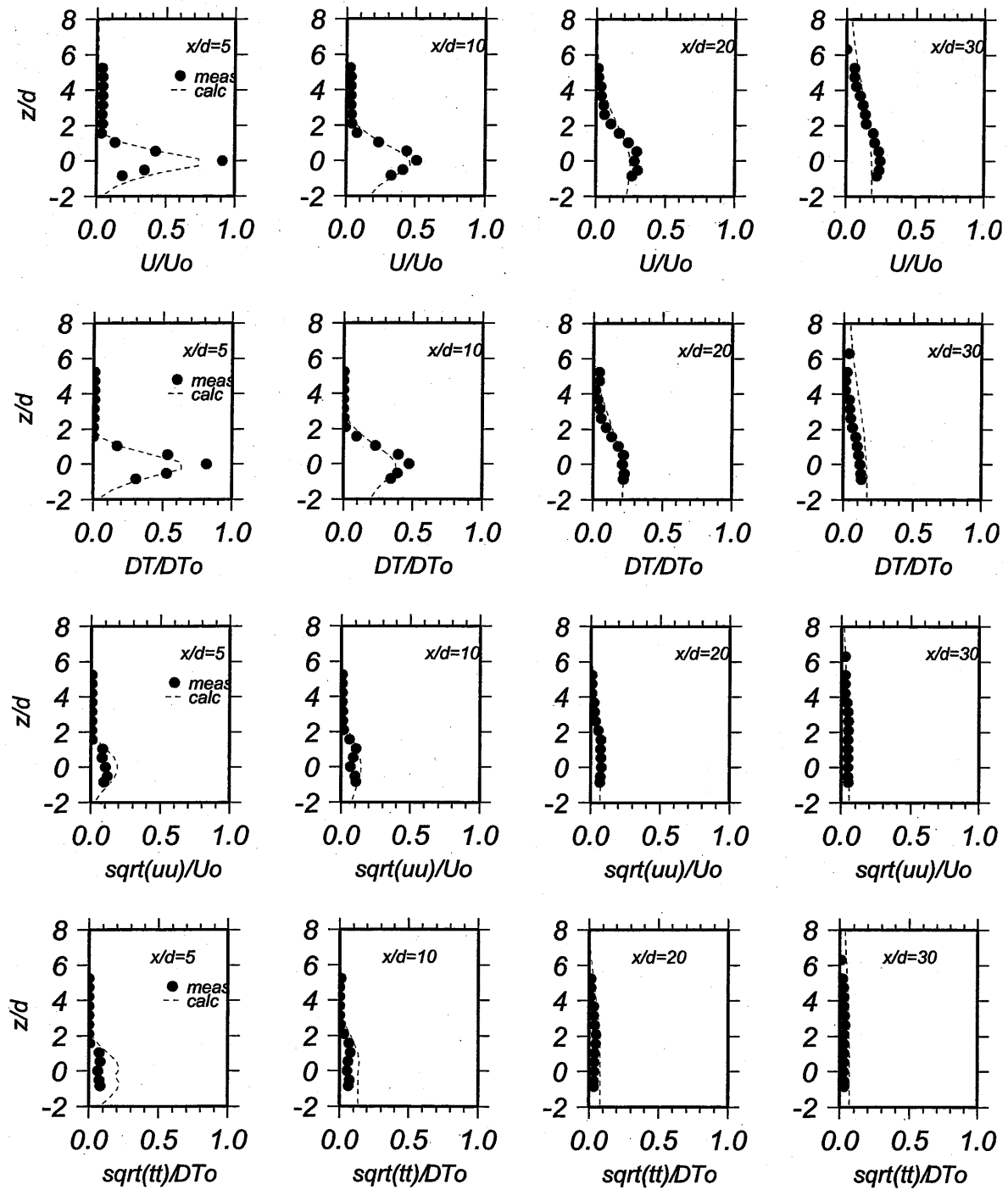
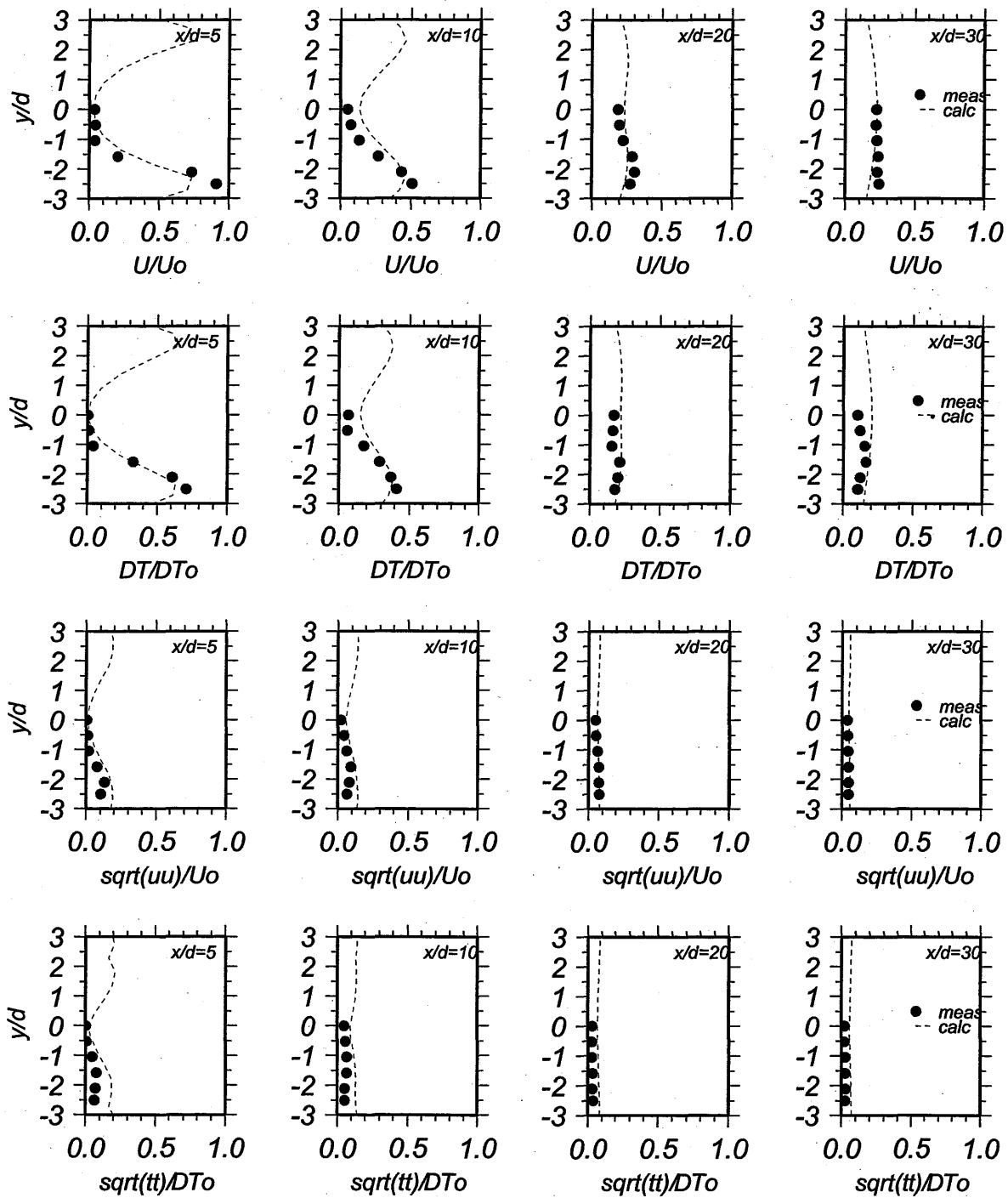


図 2.25 計算および実験で得られた流速 U , 上昇水温 DT , 変動量 uu, tt の鉛直分布 (case2)

図 2.26 計算および実験で得られた流速 U , 上昇水温 DT , 変動量 uu, tt の水平分布 (case2)

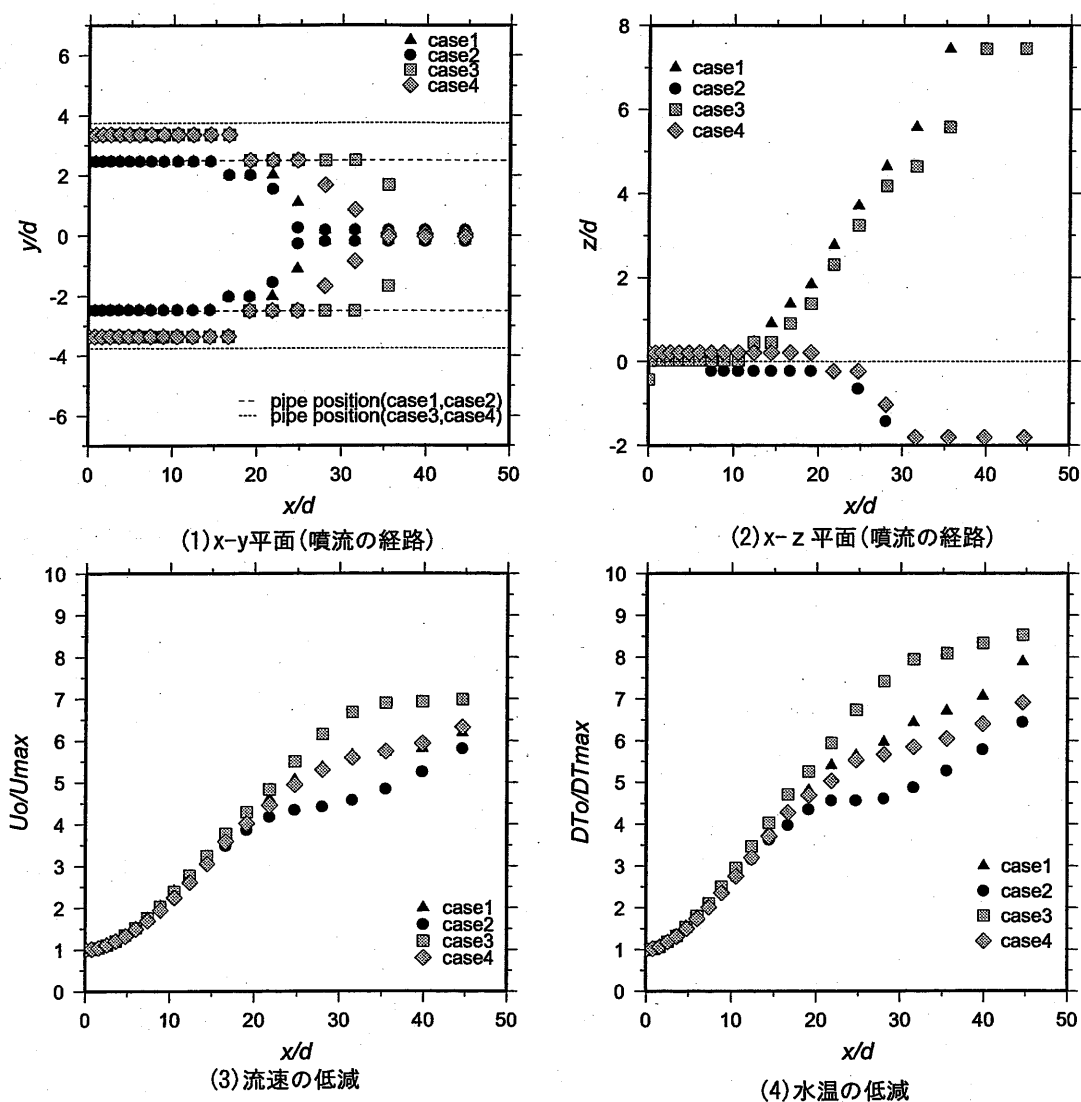


図 2.27 各ケースの噴流の経路と希釈率

ないこと、また底面の影響が小さいために鉛直経路では浮上することから、3次元的に周囲水を連行するため、流速および水温は $x/d = 20$ 以降もそれ以前と同様に低減している。しかし、case3 以外では $x/d = 20 \sim 30$ 前後において流速、水温の低減率が悪化する。特に、放水口間隔が狭く、底面の近くで放水する case2 において最も低減率が悪化する。この結果は、case2 の経路が、 $x/d = 20$ において、水平では2管の内側に移動し、鉛直では底面に沿うように移動していることから、低減率の悪化は、2つの噴流の相互干渉および噴流の上側からしか連行できなかったためと考えられる。

(2) 噴流の経路と横断面上の水温および圧力分布

噴流の周囲水の連行を検討するために、噴流の横断面上における圧力分布および2次流について検討を行う。図 2.28 に、case1 の横断面上の流速、上昇水温および圧力分布を示す。また、図 2.29 に case2 の横断面上の流速、上昇水温および圧力分布を示す。ここに、図 2.28、図 2.29 の (1) では $x/d = 6$ の断

面(a-a断面)を、(2)では $x/d = 12.42$ での断面(b-b断面)を、および(3)では、 $x/d = 16.34$ での断面(c-c断面)の結果を示す。コンターの間隔は、上昇水温を $0.5(^{\circ}\text{C})$ 間隔、圧力を $10(\text{Pa} \times 10000)$ 間隔で表示している。流速は、横断面での流速 v, w を示しており、2次流を示している。

case1は、放水口の内部フルード数が小さく、また放水口の高さが十分にあるため、放水された温排水が浮上経路を取り、周囲水が噴流下面からの十分に連行されるケースである。放水口近傍のa-a断面では、底面の影響により噴流下面からの連行が若干抑制されているが、周囲水はほぼ均等に噴流の周囲から連行されていることが分かる。放水口から離れたb-b断面、c-c断面では、浮力の影響により噴流内の流速が浮力により上向きになるとともに、下面からの周囲水の連行が大きくなる。

case2は、放水された噴流が底面を這いながら拡散するケースである。これは、流体が境界に沿って流れようとするコアンダ効果[Johnston et al. 1993]によると考えられ、粘性と圧力低下の影響により噴流が壁面に沿いながら拡散する。case1と比較して、case2の圧力分布は、全断面において噴流内の圧力低下が大きくなっており、噴流が上からの環境水により壁面に押し付けられ、底面に沿うと考えられる。さらに、a-a,b-b,c-c断面では、噴流の下面からの周囲水の連行が無く、常に上面・側面からの周囲水の連行しかないことが分かる。このような結果から、一度底面に沿うような経路となると、浮力の影響があったとしても、コアンダ効果による圧力低下の影響が大きくなり、下面からの連行が抑制され、上面からしか周囲水が連行されないために、浮上することが出来ないことが分かる。さらに、下面からの連行が抑制されるために、浮上経路の場合と比較して流速の低減も悪化し、圧力低下も小さくならず、放水口から離れても浮上しにくいことが分かる。

case1, 2における横断面の圧力分布を見ると、流速が大きいcase2での噴流の中心圧力が小さくなっている。また、case1, case2の横断面の流速結果を見ると、どちらの結果も2つの噴流の周囲から2つの噴流の中心に向かって流れており、2つの噴流が相互干渉していることが分かる。

2.2.2(1)において、複数管からの噴流が、単管の場合と比べて浮上しにくくなる結果が得られたが、以上の結果から、次のように説明できる。まず、複数管での噴流は、各噴流が干渉することから流速の低減を抑制され、単管から放水される噴流よりも流速の低減が悪化する。そのため、複数管からの噴流は、単管からの噴流と比較して、流速が低減しにくいことから、底面に沿おうとするコアンダ効果が大きくなり、放水口から離れた距離にあっても底面を沿うように拡散する。

2.4 まとめ

本研究では、複数管から水中放水される温排水が放水口から海表面まで浮上するまでの放水近傍域の温排水拡散を対象に、水理実験を行い、さらに数値モデルの適用性の検討を行った。

まず、複数管として基本的な場合である2管から水平に放水される密度噴流について水理実験を行い、近接する噴流が重なり相互干渉しあって連行量が抑制され、複雑な挙動を示す領域の流速・水温の乱流量や拡散挙動等をレーザードップラー流速計や熱電対を用いて把握した。次に、非静水圧かつ乱流モデル($k-\epsilon$ モデル)を採用した3次元数値モデルを構築した。そして、この3次元数値モデルを実験結果に適用し、流速、水温の分布等の比較検討により本モデルの再現性・適用性の検討を行った。最後に本数値モデルで得られた、水平に放水される密度噴流の経路に関する考察を行った。得られた成果を以下にまとめる。

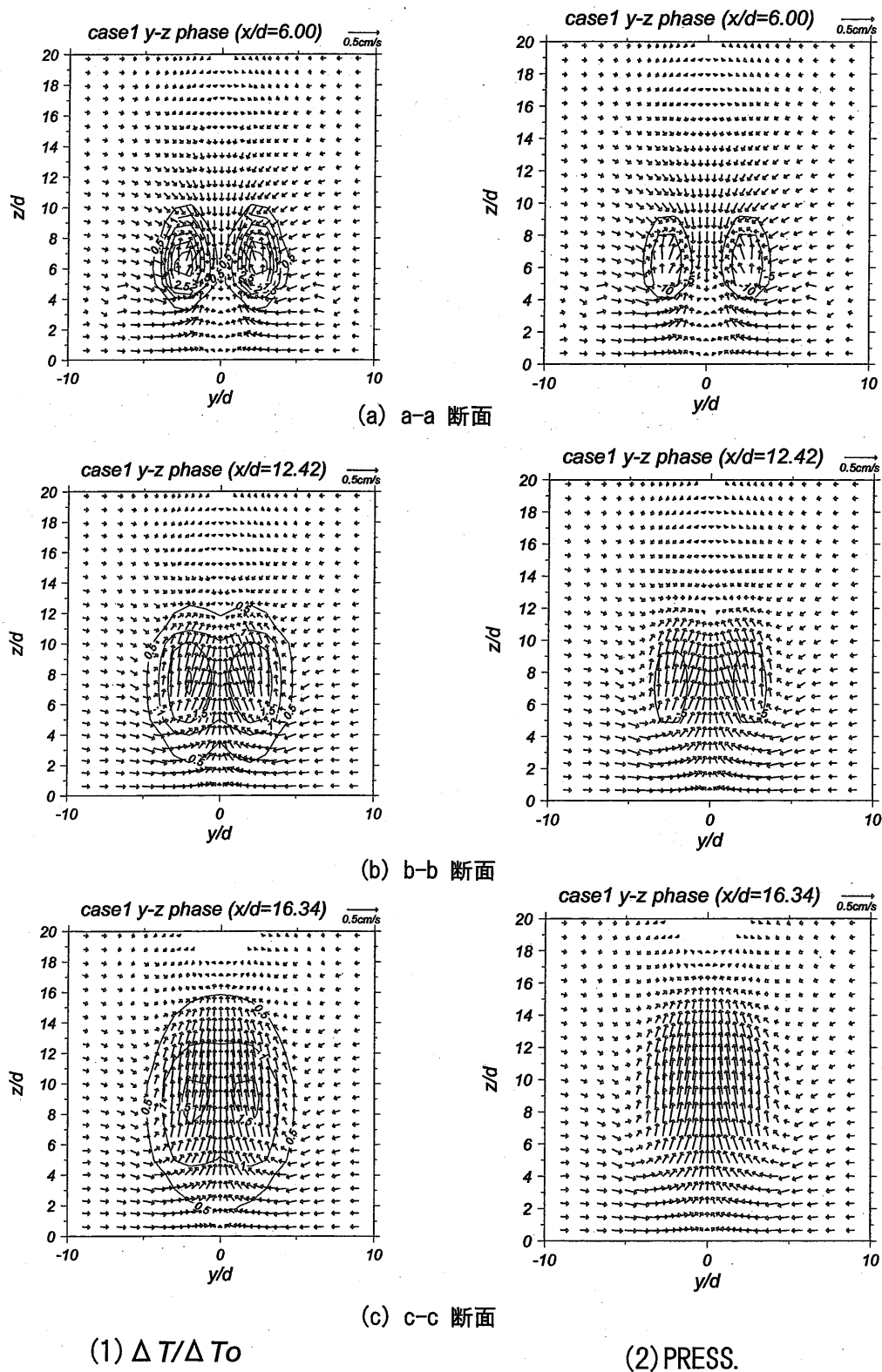
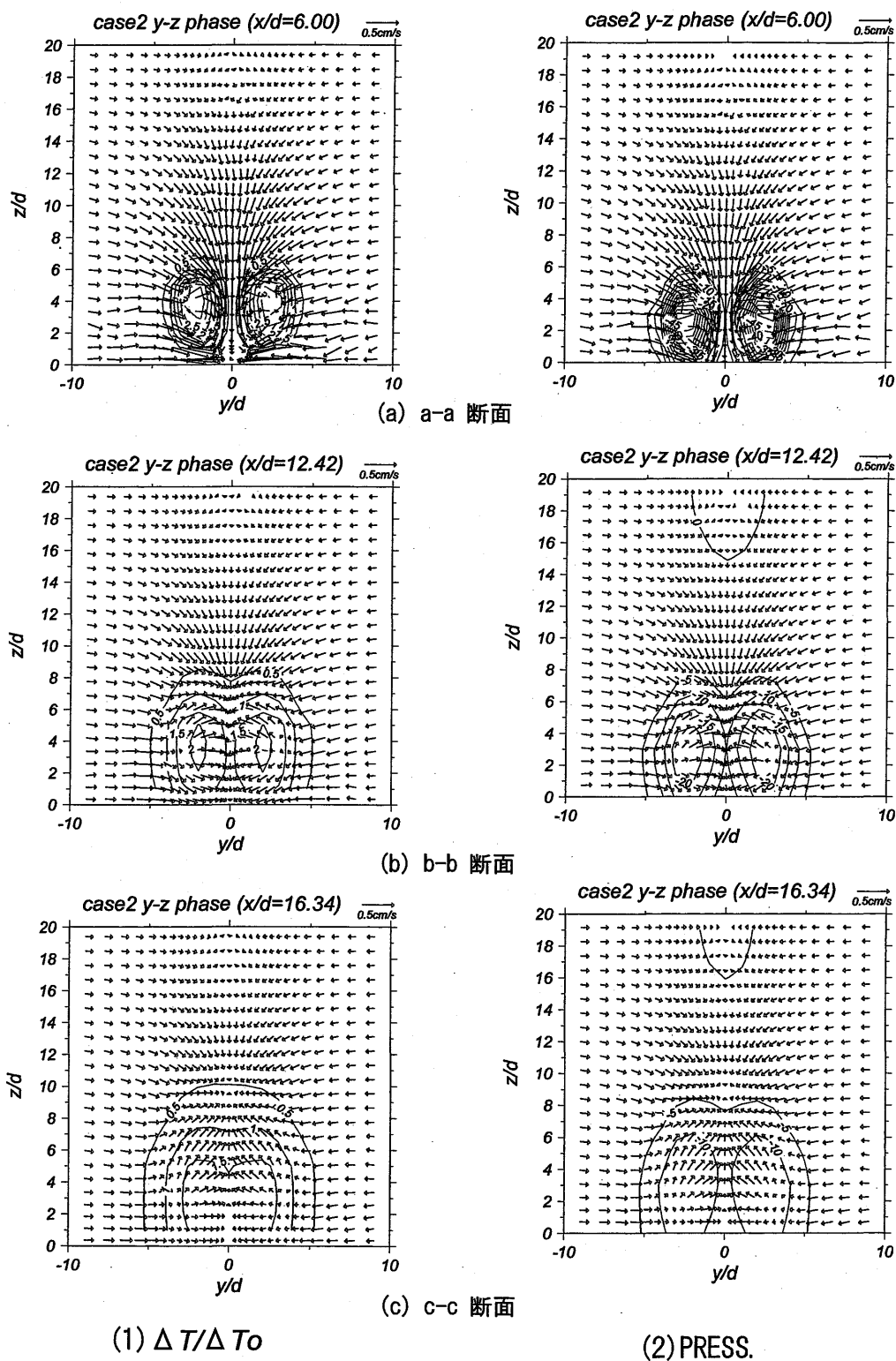


図 2.28 横断面での上昇水温および圧力分布 (case1)



コンターの間隔=0.5 °C, 5Pa/10000

図 2.29 横断面での上昇水温および圧力分布 (case2)

1. 水理実験により得られた結果

- 水平方向に放水される密度噴流は、放水口中心から底面までの距離および放水口での密度フルード数からなる放水条件により、浮上経路となる場合と、浮上せずに底面に沿う直進経路となる場合の2つに分かれる。2 放水管の場合では、単管の場合と比べて、各噴流の相互作用により、流速の低減が抑制され、浮上しにくくなる傾向を示す。ただし、2 放水管の間隔が、管の直径の10 倍程度になると、各噴流間の相互作用は小さくなり、各噴流は単管から放水された場合と同様の希釈・拡散挙動を示す。
- 噴流が浮上経路となる場合での鉛直経路は、単管から放出された場合と同様に、流下距離 x/d の3 乗に比例する。噴流の水平経路は、2 放水口間において連行が抑制されるため、各噴流は流下距離 $x/d=20$ 付近より2 管の内側に移動する。ただし、放水口間の間隔が広い場合 $D/d=10$ では、各噴流間の相互作用が見られず、噴流の水平経路は各放水管中心軸上となる。
- 浮上経路および直進経路のどちらの放水条件でも、流速および上昇水温の平均量の鉛直分布は、Gauss 分布に近い形状となり、流下方向に相似な形状となる。変動量の鉛直分布は、流下方向に相似な形状となり、値が噴流の中心で小さく、噴流の端で大きくなる双頭形となる。そして、変動量の大きさは、最大で平均量の0.2 から0.3 となる。
- 流速および上昇水温の平均量の水平分布は、流下するにつれて、2 つの噴流の相互干渉によって連行希釈が抑制された結果、各噴流が重合する領域において分布が一様になる傾向にあり、各変数の値が2 つの噴流の内側で大きく、外側で小さくなる分布となる。変動量の分布は、値が2 噴流の内側で小さく、外側で多くなる形状となる。

2. 3次元数値モデルを適用した結果

- 噴流が浮上しながら拡散・希釈する場合および底面近傍で拡散・希釈する場合の両ケースにおいて、噴流の3 次元的（水平、鉛直）な経路、噴流内の流速・水温の低減率や分布形、変動強度等について、数値計算結果と測定結果は良く一致した。これにより、水中放水口から海表面まで浮上するまでの放水口近傍での温排水の各噴流間の相互作用や底面の影響による連行量の抑制等の拡散挙動について、本数値モデルが精度よく計算できることが分かった。
- 非静水圧のモデルを用いたことにより、浮上経路および直進経路における密度噴流内の圧力低下した結果が再現できた。この圧力低下を再現できたことにより、単管に比べて複数管からの噴流が直進経路となりやすい結果や、噴流が一度直進経路をとると放水口から離れても、継続して直進する結果が再現できたと考えられる。

以上の結果から、温排水拡散範囲予測において重要となる、水中放水口から表層へ浮上するまでの放水口近傍における密度噴流の拡散挙動について、3 次元数値モデルが、精度よく再現できることが分かった。さらに、本モデルを使用することによって、放水条件の検討も実施可能であることが示唆された。

実際の温排水拡散予測では、放水口近傍だけでなく遠方での表層での水平的な拡散予測を実施する必要がある。また、本研究では、水中・表層放水口が近接設置された温排水の拡散予測が目的であることから、このような現象の把握および数値モデルの再現性の把握が必要となる。3 章以下では、水中放水された温排水が表層に浮上した後、および表層放水された温排水の表層における温排水の拡散形態の検討、および数値モデルの検討を実施する。

参考文献

- Chen, C. J., 田中伸和, 1992: CHEN & TANAKA による乱流モデルの基礎と応用. 構造計画研究所.
- Chu, P. C. K., J. H. Lee and V. H. Chu, 1999: SPREADING OF TURBULENT ROUND JET IN COFLOW. *J. Hydraulic Eng.*, **125**, 2, 193-204.
- Davidson, M. J. and K. L. Pun, 1999: WEAKLY ADVECTED JETS IN CROSS-FLOW. *J. Hydraulic Eng.*, **125**, 1, 47-58.
- Johnston, A. J. and E. Volker, 1993: Round Buoyant Jet Entering Shallow Water in Motion. *J. Hydraulic Eng.*, **119**, 12, 1364-1382.
- Johnston, A. J., C. R. Phillips and E. Volker, 1994: Modeling Horizontal Round Buoyant Jets in Shallow Water. *J. Hydraulic Eng.*, **120**, 1, 41-59.
- Kim, D. G. and I. W. Seo, 2001: Modeling the mixing of heated water discharged from a submerged multiport diffuser. *J. Hydraulic Res.*, **38**, 4, 259-269.
- Pani, B. and R. Dash, 1983: Three-Dimensional Single and Multiple Free Jets. *J. Hydraulic Eng.*, **109**, 2, 254-269.
- N. ラジャラトナム, 野村安正訳, 1980: 噴流. 森北出版.
- 室田明, 中辻啓二, 玉井昌宏, 1989: 二次元フォーストブルームの乱流行象に関する実験的研究. 土木学会論文集, **42905II-11**, 79-87.
- 水鳥雅文, 片野尚明, 仲敷憲和, 1992: 鉛直重力噴流拡散予測モデルの開発. 研究報告:U 88051, 電力中央研究所.
- 数値流体力学編集委員, 1995: 乱流解析. 東京大学出版.
- 石崎博, 1981a: 乱流噴流の特性に関する研究 (第1報). 日本機械学会論文集, **48**, 1962-1700.
- 石崎博, 1981b: 乱流噴流の特性に関する研究 (第2報). 日本機械学会論文集, **48**, 1701-1708.
- 石崎博, 1982: 乱流噴流の特性に関する研究 (第3報). 日本機械学会論文集, **49**, 1650-1657.
- 仲敷憲和, 松梨史郎, 坂井伸一, 丸山康樹, 1996: 水平方向に放出された重力噴流の挙動について. 水工学論文集, **40**, 537-542.
- 椿東一郎, 小松利光, 1978: 2次元表面密度噴流における流れの特性と連行現象. 土木学会論文集, **273**, 69-81.
- 藤井孝蔵, 1994: 流体力学の数値計算法. 東京大学出版.
- 福嶋祐介, 1984: $k-\epsilon$ モデルによる平面二次元密度噴流と噴流の相似解析. 土木学会論文集, **405II-11**, 147-154.
- 片野尚明, 1983: 水中放流方式による温排水の混合希釈家庭に関する研究. 博士論文, 日本大学.

第3章

水中・表層放水口から同時放水された密度噴流の拡散特性と数値解析

3.1 はじめに

水中放水方式、もしくは表層放水方式で単独に放水される温排水、すなわち密度噴流の拡散形態、挙動に関連した研究は、これまで多くの実験的、数値解析的、および理論的に行われてきており、実海域に放水される温排水の拡散範囲予測および影響低減化等に、その解析手法、結果が用いられてきた[放水形式によらず多くの研究がなされており、例えば、表層放水された温排水に関わる理論および水理実験による研究では、室田ら(1990), (1984); 椿ら(1978); Bocard(1984), (1985) 等がある。また、表層放水された温排水に関わる数値計算による研究では、小松ら(1987); 井上ら(1996) 等がある。そして、水中放水された温排水に関わる水理実験による研究は、石崎(1981a); 片野(1983), (1978); Johnston et al. (1994), (1993) 等がある。さらに、水中放水された温排水に関わる数値計算では、仲敷ら(1996), (1996); 坪野ら(1997b); 高田(1999); 水鳥ら(1992) 等がある]。一般に、表層放水口から放水される密度噴流は、水温上昇域が、表層に薄く、横断方向に大きく拡散し、一方、水中放水口から放水された密度噴流は、表層に浮上後、鉛直方向に厚く、横断方向には小さく拡散することが知られている。しかし、このようにそれぞれ異なる拡散形態をもつ密度噴流が近接して放水される場合の、拡散形態、挙動に関する研究、知見がほとんどない。そのため、本研究では、近接設置された水中・表層放水口から密度噴流を同時放水する水理実験を行い、噴流の拡散形態について検討を行った。

前章での数値モデルでは、密度噴流が浮上するまで、すなわち放水口近傍での領域について適用性の検討を行ったが、数値モデルを実海域に放水される温排水の拡散範囲予測に適用するには、海表面における噴流の拡散挙動について再現性の検討が必要となる。そこで、本章での水理実験に数値モデルを適用を行い、特に、水中放水口から放水された温排水が、水面に浮上した後に表層で拡散する領域、表層放水された重力噴流が表層で拡散する領域、および、水中・表層放水口から同時放水された温排水の拡散形態について、数値モデルの再現性の検討を行った。

水中・表層放水口から同時放水された密度噴流が重合する領域における上昇水温の鉛直分布に着目し、クラスター分析を適用し、鉛直分布の分類を行った。クラスター分析では、まず実験結果に適用して水中・表層・同時放水における拡散形態の検討を行い、次いで計算結果にも適用を行った。

次節以降では、2節において水理実験の内容を説明し、水理実験から得られた両放水口からの密度噴流

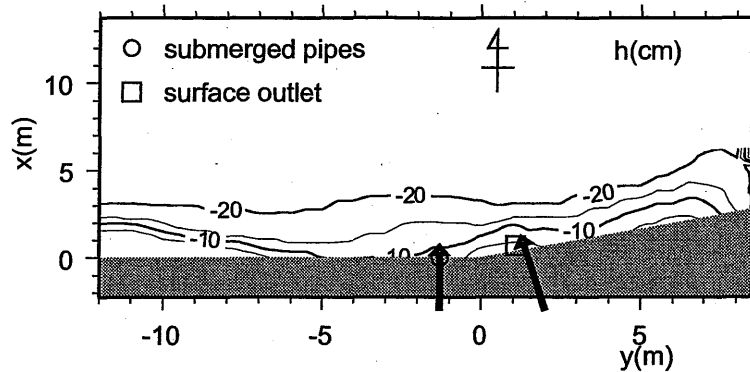


図 3.1 実験水槽および放水口の位置

の拡散形態の考察を行う。そして、3 節において数値モデルの再現性の検討を行う。さらに、4 節において実験結果と数値計算結果についてクラスタ分析を適用した結果について検討を行う。最後に、5 節においてまとめを行う。

3.2 水理実験による検討および考察

3.2.1 実験装置および計測方法

使用した実験装置は、図 3.1 に示すような幅 21m、長さ 16m、高さ 0.46m の平面水槽である。そして、この水槽に海岸地形および放水口を設置して実験を行った。座標は図 3.1 に示すように、水中放水と表層放水口の間を原点を、そして沖合方向を x 軸にとった右手系の座標とした。

表 3.1 に放水条件を示す。ここに、 $Fr = U/(\epsilon H)^{1/2}$: 内部フルード数、 $Re = Uh/\nu = UD/\nu$: レイノルズ数、 $\epsilon = \delta\rho/\rho = 0.0015$: 相対密度差、 $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$: 動粘性係数である。

この放水条件は、実スケール上の放水条件を、表層放水については、放水流量: $80 \text{ m}^3/\text{s}$ 、放水流速: 1 m/s 、放水口高さ: 2 m 、放水口幅: 40 m 、および水中放水については、放水流量: $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 、放水流速: 4 m/s 、パイプ口径: 2.523 m を想定した、縮尺 $1/150$ の無歪み模型の条件である。

表層放水口の位置 (x, y) を $(x, y) = (0.9 \text{ m}, 1.1 \text{ m})$ とし、水中放水口の位置 (x, y) を $(x, y) = (0.225 \text{ m}, -1.3 \text{ m})$ とし、各放水口を図 3.1 の口、△に示すように設置し、汀線と直角方向に放水を行なった。

各放水口の放水水温は、想定した実スケールの海域の条件を環境水温 $T_e = 11.0^\circ\text{C}$ 、塩分 34.1 を想定し、 $\Delta T_0 = 7^\circ\text{C}$ となる密度差になるように設定した。

水温測定はサーミスタ型水温計を架台に 169 本設置し、水平方向および鉛直方向 (11 層) に逐次移動させて、データ収録装置に記録した。水温測定は、密度噴流が十分に定常に達したと判断される 15 ~ 20 分後から開始し、境界の影響を受けない時間 (40 分程度) まで行った。水温値は 0.7 秒間隔で 25 回測定した平均値を採用した。

表 3.2 に実験ケースを示す。まず、静水場に噴流を水中放水、表層放水、水中・表層同時放水した 3 ケースの実験を行い、さらに、水槽内に一定の流れを作成した状態で、噴流を水中・表層同時放水を行い、流れの向きに応じて 2 ケースの実験を行った。以降より、表中の RUN1~3 までのケースを流れ無し、ま

表 3.1 各放水口の放水条件

水中放水の放水条件							
放水流量 $Q1$ l/s	放水速度 $u1$ cm/s	パイプ口径 D cm	放水水深 d	パイプ数	パイプ間隔 L	内部フルード数 $Fr1$	レイノルズ数 $Re1$
0.363	32.65	1.68	$3D$	5	$3D$	18.	5491
表層放水の放水条件							
放水流量 $Q2$ l/s	放水速度 $u2$ cm/s	放水口高さ H cm	放水口幅 l cm			内部フルード数 $Fr2$	レイノルズ数 $Re2$
0.29	8.16	1.33	26.67			5.	1085

表 3.2 実験ケース

RUN	放水形式	場の流れ
1	水中放水	なし
2	表層放水	なし
3	水中, 表層混在	なし
4	水中, 表層混在	西流 -0.8cm/s
5	水中, 表層混在	東流 0.8cm/s

たは静水状態のケース, RUN4,5 のケースを場の流れを考慮したケースと呼ぶ。

場の流れを考慮したケースである RUN4,5 は, 実海域スケール $\pm 10\text{cm/s}$ で汀線方向に流れる場を想定して行なった。模型内の流れについては, 水槽長手方向の両側に水深を一定に保つための多孔分散管を配置し, その間をポンプ管路系によって水を循環させることにより, 模型内に流れを与えた [片野,1978]。

3.2.2 実験結果の考察

静水状態に, 水中放水形式, 表層放水形式それぞれで単独放水した場合, および表層放水形式と水中放水形式で同時放水した場合における, 密度噴流の拡散形態について検討を行った。そして場の流れを考慮した状態に, 水中・表層放水口から同時放水した密度噴流の拡散特性について検討を行った。

(1) 静水状態で放水した場合

■表層での水平分布 図 3.2, 図 3.3, 図 3.4 に, RUN1, RUN2, RUN3 の表層における上昇水温 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布を示す。図中の+, Δ , \bigcirc , は, 汀線に平行な各横断面における上昇水温最大値の位置を示している。また, 図 3.4 の \square , \star は, 各放水口前面での計測地点を示している。以降, T_e は環境水温を, T は任意の点での水温を, T_0 は放水水温を示す。そして, $\Delta T = T - T_e$ は任意の地点での上昇水温, $\Delta T_0 = T_0 - T_e$ は放水口での上昇水温を示す。

RUN1, RUN2 のコンターの形状は, 放水方式により異なるが, これらの上昇水温の分布はこれまでの研究により, 良く知られた形状となっており, RUN1 では, 水中放水された温排水が浮上した後, 表層に

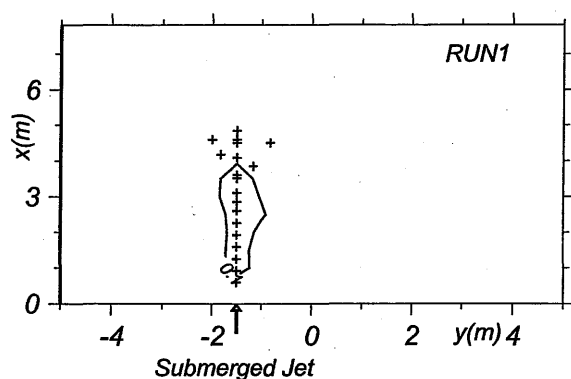


図 3.2 表層での水温上昇率 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布 (RUN1:水中放水単独の場合)

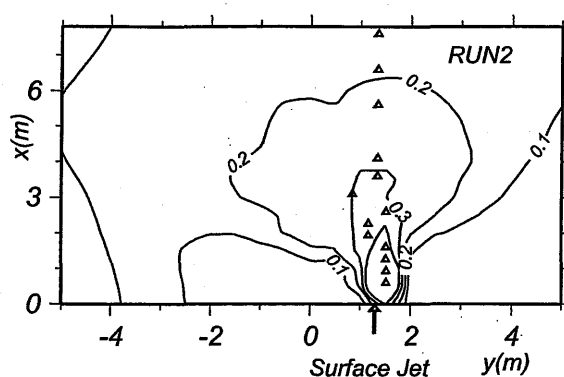


図 3.3 表層での水温上昇率 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布 (RUN2:表層放水単独の場合)

において小さな面積で拡散し [片野,1983], RUN2 では, 表層放水された温排水が横断方向に拡散した (例えば, [Bocard,1985] 等).

水中放水と表層放水が混在するケース RUN3 では, $\Delta T/\Delta T_0 = 0.1, 0.2$ のコンターの形状が, 両放水口に挟まれた領域において, 一定の幅を保ちながら沖合方向に伸びる結果となった. 特に表層放水口からの噴流の上昇水温は, 表層単独放水 (RUN2) のように放射状に拡がるような水平分布とはならず, 両放水口に挟まれた領域で沖合に伸びていく分布となった.

上昇水温最大値の位置を見ると, RUN1,2 では各放水口の前面に位置するのに対し, RUN3 では, $x = 4\text{m}$ 程度までは表層放水口前面に位置し, それ以降, 最大値の位置は沖合方向に進むにつれて, 徐々に水中放水口側に移動し, 約 $x = 5.5\text{m}$ の位置より水中放水口と表層放水口前面の中心の位置に移動する結果となった.

以上の結果から, 水中・表層同時放水された温排水は, 水中・表層単独放水された分布を用いて線形的な重ね合わせなどで, 水温分布を再現することが難しいことが分かる.

表層放水口近傍での浮標による流速測定結果をみると, 表層単独放水 (RUN2) では放水口を中心に放射状に拡がる流れとなったのに対し, 同時放水された測定結果 (RUN3) では, 表層放水口よりも右側の領域において, 表層放水口の外側右の領域から水中放水口および表層放水口に挟まれた領域へ流れる流速が観測された. また, 両放水口に挟まれた領域では, 水中放水口側にシフトしながら沖合方向に向かう表層放水口からの流れが観測された. このことから, 水中・表層同時放水された温排水は, 放水流速が大きい水中放水起因の噴流の連行により, 表層放水起因の噴流が汀線方向右側への拡散が抑制されることが分かる.

■希釈効果 図 3.5 に図 3.2, 図 3.3, 図 3.4 に示した記号の位置 (○等) における最大上昇水温の低減率 $\Delta T_{max}/\Delta T_0$ を示す. RUN3 については, 各放水口の前面での希釈効果も併せて検討するため, 水中放水口前面の図中の□の位置 ($y = -1.3\text{m}$) における上昇水温の最大値 RUN3(1), そして表層放水口前面の☆の位置 ($y = 1.1\text{m}$) における上昇水温の最大値 RUN3(2) も図 3.5 に併記している.

図 3.5 のように噴流の低減率を示す場合, 仮想原点を設定して原点を合わせる (例えば, [Rajaratnam, 1980; 石崎, 1981a] 等) が, 今回の水理実験では放水口近傍で測定点が少ないために仮想原点が設定できないことから, 原点は放水口の位置を示している. また通常, 沖合い方向の距離 x についても, 水中放水口

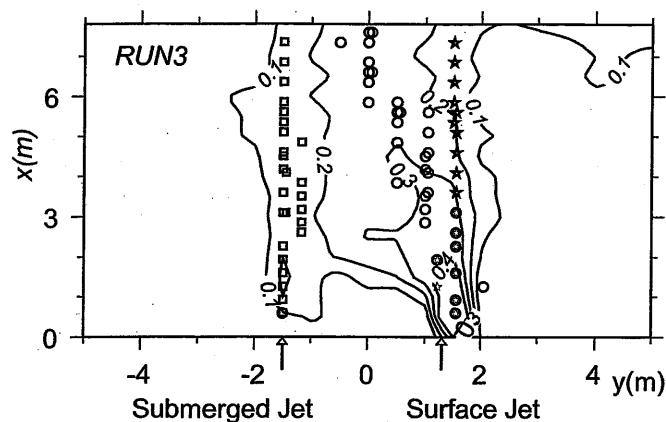
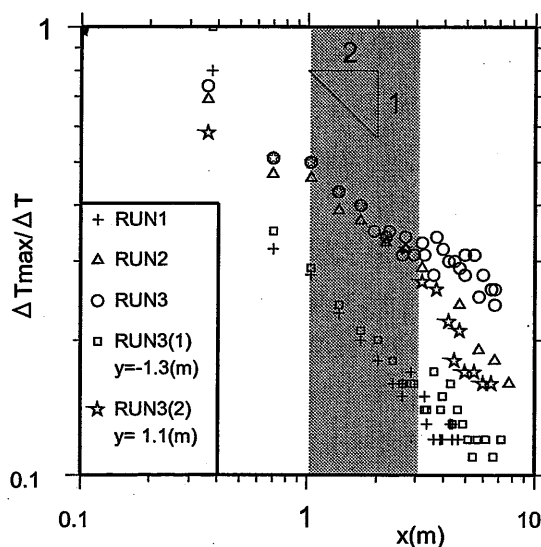
図 3.4 表層での水温上昇率 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布 (RUN3:水中・表層同時放水の場合)

図 3.5 上昇水温の低減率

では口径 D で、そして表層放水口では径深等で無次元化を行うが、今回のように水中・表層放水された噴流が混在する場では、無次元化するためのスケールについて判断出来なかったため、放水口からの距離 x の値で示している。

水中放水 (RUN1) および表層放水 (RUN2) の上昇水温の低減は、放水口近傍 $x = 1\text{m}$ 周辺までは、初期の混合希釈の様相が異なるため、低減率が違ったものになる。特に、RUN1 では、放水流速の大きく、さらに放水後の密度噴流が浮上するまでに 3 次的に周囲からの水を連行できることから、RUN2 と比べて水温の低減が大きくなる。

$x = 1\text{m}$ 以降では RUN1 の噴流は表層に浮上し、表層で拡散希釈するため、 $\Delta T_{\max}/\Delta T_0$ の低減する勾配は表層放水で放水されたものと同じ、距離の $-1/2$ 乗程度となる。片野 (1983) は、水中放水口から放水される水平密度噴流の水理実験を行っており、この噴流が表層に浮上し、十分発達すると、表層から放水される密度噴流と同じように無次元化された距離の $-1/2$ 乗程度の低減率となることを示しており、

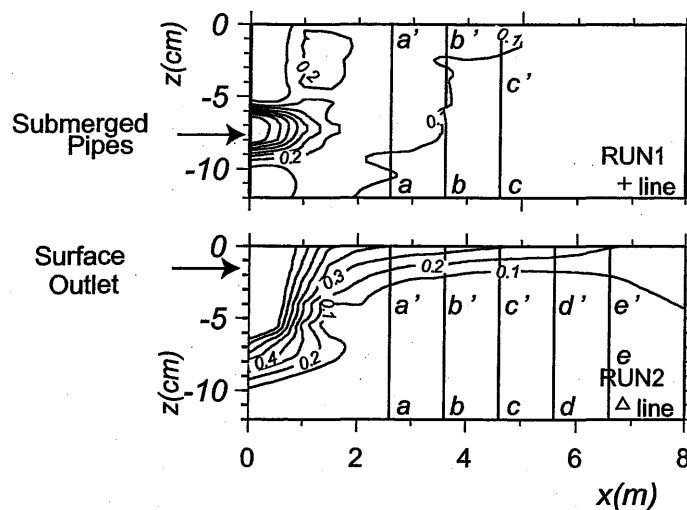


図 3.6 RUN1,2 の鉛直断面の水温分布

距離について無次元化をおこなっていないが、本水理実験の単独放水の結果も同様に低減していることが分かる。

水中・表層同時放水されたケース RUN3 での各放水口の正面の位置 RUN3(1),(2) における上昇水温の低減の結果をみると、RUN3(1),(2) も $x = 4\text{m}$ 程度までは、単独放水のケース (RUN1,2) の結果と同程度に低減しており、さらに網掛け部 ($x = 1 \sim 3\text{m}$ 程度) での水温低減の勾配も、単独放水のケース (RUN1,2) と同様に距離の $-1/2$ 乗程度の低減率となっている。このような結果から、沖合方向 $x = 1 \sim 3\text{m}$ 程度までは、放水口前面で水中放水、表層放水それぞれの拡散、希釈過程となっていることが分かる。しかし、 $x = 4\text{m}$ 以降の各放水口の正面 RUN3(1),(2) での水温低減をみると、RUN1,2 と異なる結果となり、RUN3(1) では希釈が悪く、RUN3(2) では希釈がよくなる結果となっている。

RUN3 の放水方向の最大水温の位置 (以降、噴流の経路と称す。) での低減率 (RUN3) をみると、 $x = 3\text{m}$ 程度までは上昇水温の最大値の位置が RUN3(2) とほぼ同じであるため、RUN3(2) と同じ低減率で希釈していくが、RUN3(1),(2) の低減率が変化する位置 $x = 4\text{m}$ で一度低減率が悪くなっている。このような結果は、本実験で採用した両放水口の距離では、沖合い方向の距離 $x = 4\text{m}$ において、両噴流が相互干渉して水温の低減が抑制されたためと考えられる。

$x = 4\text{m}$ 以降では、各放水口の前面の低減率 (RUN3(1),3(2)) および RUN3 の低減率は、網掛け位置の低減率と同様に約 $-1/2$ 乗という同じ勾配で低減していることから、水中・表層同時放水された噴流の相互干渉後での拡散形態は、単独放水 RUN1,2 された密度噴流が表層で拡散しているのと同様な拡散、希釈形態をしていると考えられる。

■ 鉛直分布 図 3.6 に図 3.2, 図 3.3 に示す RUN1,2 の + line および Δ line の各断面での水温分布を示す。また、図 3.7 に図 3.6 で示した a-a' ~ e-e' 上での水温の鉛直分布を示す。ここに、各鉛直分布図 3.7 は上昇水温最大値で無次元化表示している。

水中単独放水である RUN1 では、放水された噴流が、 $x = 1\text{m}$ で水面に浮上しており、a-a' ~ c-c' での鉛直分布の結果が、水深方向にほぼ一様となる。

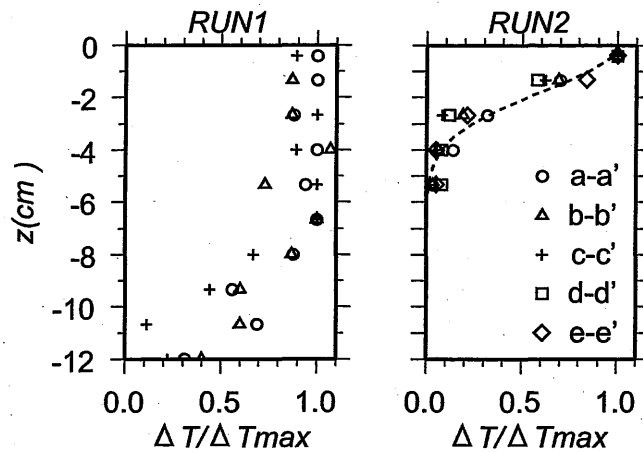
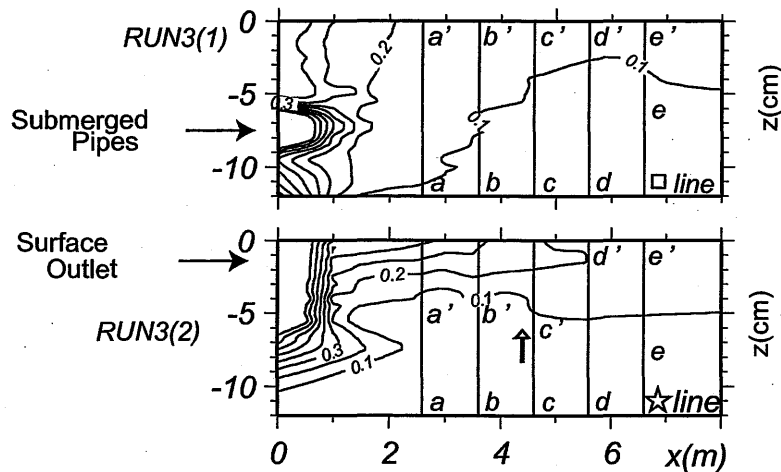
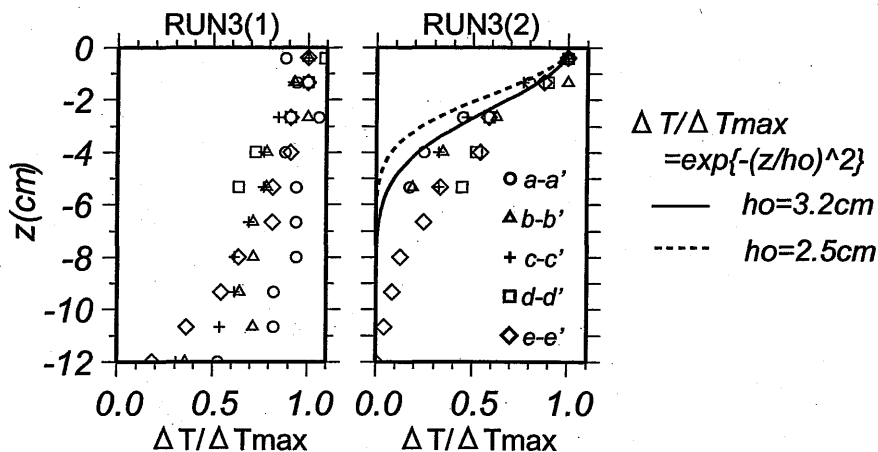
図 3.7 RUN1,2 の $\Delta T/\Delta T_{max}$ の鉛直分布

図 3.8 RUN3 の各放水口前面での水温分布:RUN3(1),(2)

表層単独放水である RUN2 では、放水口前面下部において、水温のコンターが水平方向にほぼ垂直となり、高温領域が底面まで存在しており、有田 (1986) らが表層密度噴流の初期流動形態を分類した、完全内部跳水もしくは潜り内部跳水のような形態となった。そして、この放水口近傍以降の噴流は、中辻ら (1991a) や Lukentina and Imberger(1987) が観測したように、底面からリフト・オフし、その後は、表層で水温が高く、下層で水温が低くなる。また、RUN2 の a-a'~e-e' での上昇水温は、各ラインでほぼ同じような鉛直分布となっており、水平 2 次元の温排水拡散予測モデル等で鉛直方向の水温分布を模擬するときに用いられる Gauss 曲線 $\Delta T/\Delta T_{max} = \exp(-\eta^2)$ と同様な形状の鉛直分布となった。ここに、 $\eta = z/h_o$: 無次元化された水深、 h_o : $\Delta T/\Delta T_{max} = 1/e$ の水深 (今回の点線は $h_o = 2.5\text{cm}$) である。

図 3.8 に RUN3 の水平分布図 3.4 の各放水口前面 (□と☆のライン上) の水温分布 RUN3(1),(2) を示す。図 3.9 に図 3.8 の a-a' ~ e-e' での、図 3.7 と同様に無次元化表示を行なった鉛直分布を示す。図 3.9 の点線は図 3.7 で示した Gauss 曲線で、実線は $h_o = 3.24\text{cm}$ の Gauss 曲線である。RUN3 の水中放水

図 3.9 RUN3(1),(2) の $\Delta T/\Delta T_{max}$ の鉛直分布

口前面断面 RUN3(1) の水温結果は、RUN1 と同じように $x = 1\text{m}$ 程度で浮上しており、この断面での鉛直分布は、水中放水単独 RUN1 の鉛直分布とほとんど変わらない結果となった。

表層放水口前面 RUN3(2) での水温結果も、RUN2 と同じように表層付近で上昇水温の高温部が表層に位置している。しかし、0.1 のコンターは RUN2 に比べて深い位置にあり、コンター間隔は RUN2 に比べて大きくなる。特に、図中の矢印に示した位置より沖合になると、0.1 のコンターは一時的に下方に移動し、それ以前より層厚が大きくなる。また、この断面での水温の鉛直分布も、a-a', b-b' ラインでは、表層放水単独である RUN2 に比べて、若干 h_0 が大きな値を持つが、RUN2 と同様に Gauss 曲線と同様の鉛直分布となる。しかし、図 3.9 の矢印以降の c-c', d-d', e-e' ラインでの水温の鉛直分布は、水深 $z = -3\text{cm}$ 以深において、この鉛直分布の値が、Gauss 曲線での値よりも大きくなっており、この矢印以降において、表層の暖かい水が下方に混合していることが分かる。

図 3.10 に、RUN3 の図 3.4 の O line 上、すなわち経路上の水温分布を示す。図 3.11 に、図 3.10 の a-a', ~, e-e' ラインでの鉛直分布を示す。

噴流の経路上での断面の水温の結果は、放水直後から沖合方向 $x = 3\text{m}$ 程度までは RUN2 と同様の分布を示すが、それ以降となると表層放水口前面 RUN3(2) のコンター図 3.9 に近い形状となる。そして、この断面においても、矢印で示す位置において鉛直方向に混合している。矢印位置以降の鉛直分布 c-c', d-d' を見ると b-b' の実線で示す分布から徐々に c-c', d-d' へ、太線の示す Gauss 曲線 ($h_0 = 5\text{cm}$) の分布に、下層から近づいていることが分かる。

この矢印の位置が、図 3.5 での上昇水温の低減率が一時的に悪くなる位置とほぼ一致することから、各放水口からの噴流が相互干渉し、希釈が悪くなると、鉛直方向に水中放水起因の噴流と表層放水起因の噴流が鉛直方向に混合することが分かる。

(2) 場の流れを考慮した場合

図 3.12 に RUN4 の、表層 ($z = -0.5\text{cm}$) における水温上昇率の水平分布を示す。図 3.13 に図 3.12 の x-x', y-y', z-z' 断面上の水温上昇率の分布を示す。図 3.14 に図 3.13 の a-a' ~ d-d' ラインの水温の鉛直分布を示す。

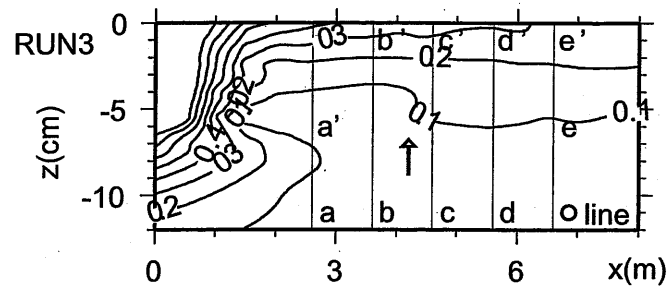


図 3.10 RUN3 の経路上の断面での水温分布:RUN3

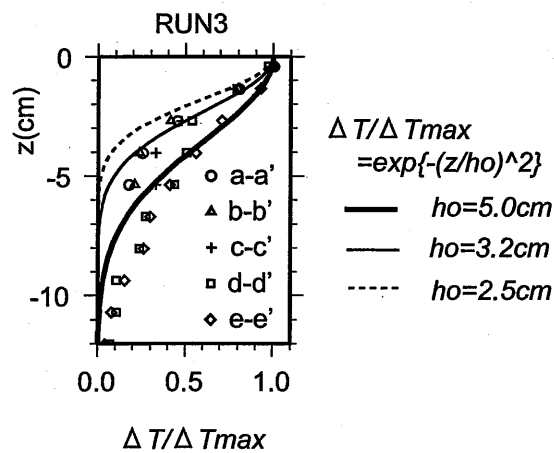


図 3.11 RUN3 の $\Delta T/\Delta T_{max}$ の鉛直分布

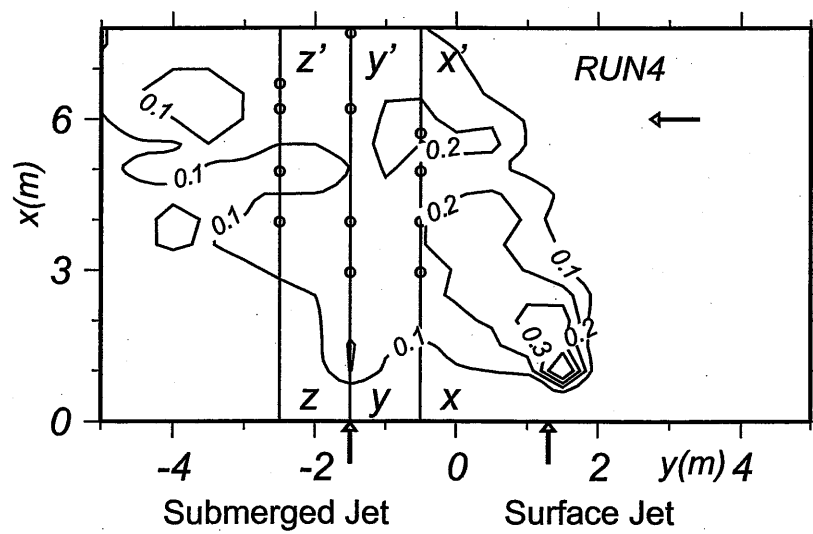
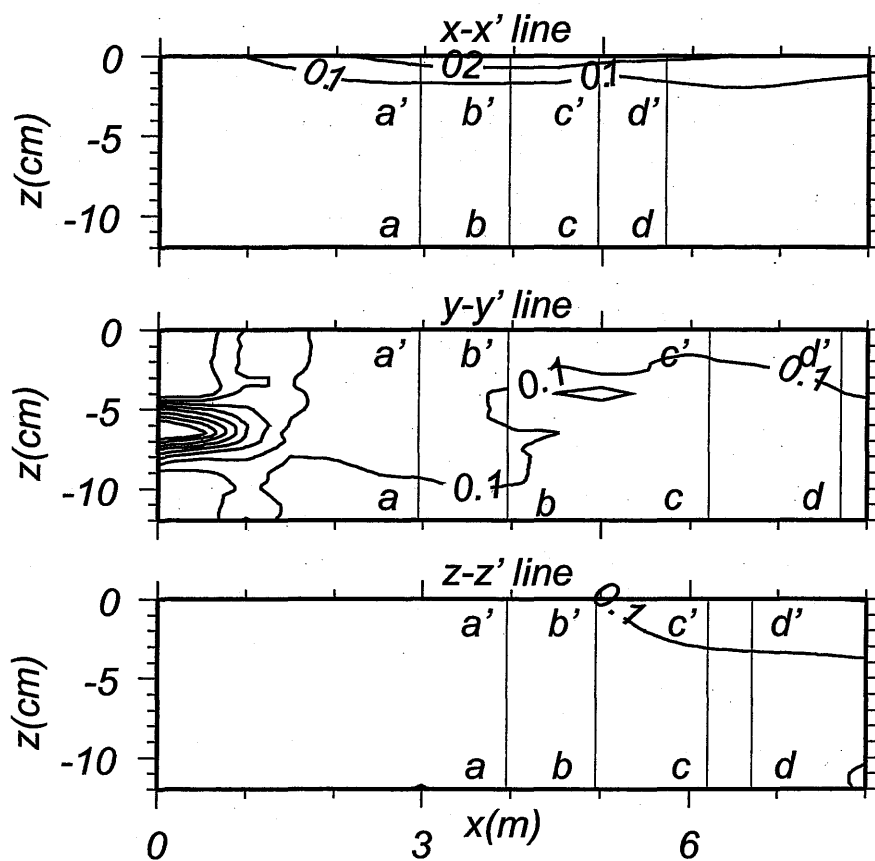
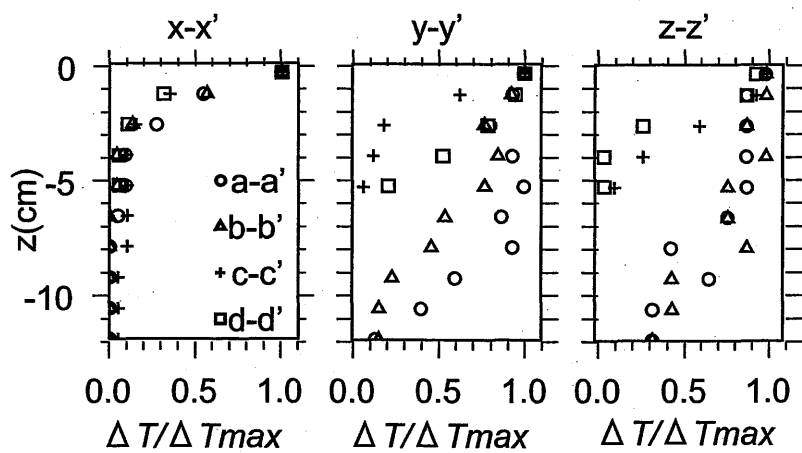


図 3.12 表層での水温上昇率 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布 (RUN4; 表層放水口が上流)


 図 3.13 図 3.12 の $x-x'$, $y-y'$, $z-z'$ line 上の断面での温度上昇率の分布 (RUN4)

 図 3.14 図 3.13 の $a-a'$ ~ $e-e'$ line 上での鉛直分布分布 (RUN4)

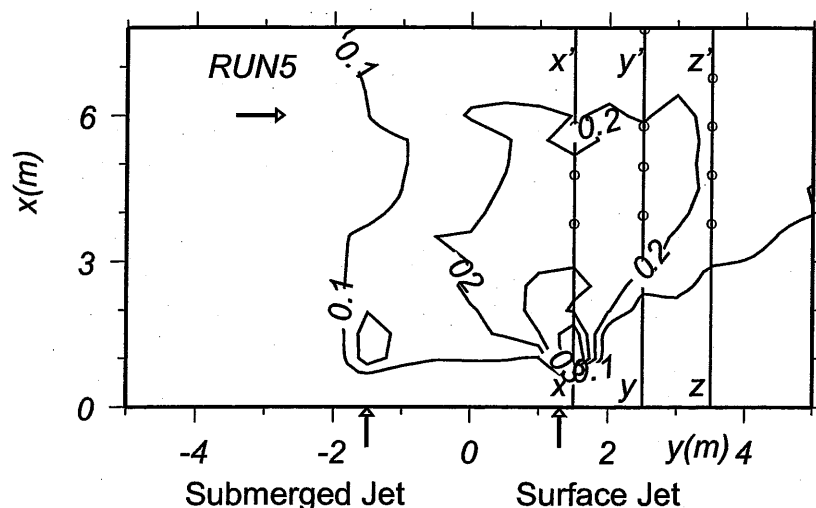


図 3.15 表層での水温上昇率 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布 (RUN5:表層放水口が上流)

表層の水平分布図 3.12 を見ると、表層放水口から放水された噴流は、場の流れにより曲げられ、水中放水および表層放水からの噴流がほとんど相互干渉せずに、水中放水の浮上する海域のまわりを反時計回りに沖合で拡散している。

流れにより曲げられた表層放水起因の噴流は、静水状態から放水開始した RUN3 では、水中放水および表層放水からの噴流が相互干渉している $x-x'$ ラインに到達しても、図 3.13, 図 3.14 に示すように上昇水温の高温部が表層に位置しており、さらに $a-a' \sim d-d'$ ラインの鉛直分布が RUN2 と同様な形状となっており、鉛直方向にも相互干渉をしていないことが分かる。

水中放水口の前面での $y-y'$ 断面、および下流側の $z-z'$ 断面上の $a-a' \sim d-d'$ の鉛直分布図をみると、汀線近傍位置である $a-a', b-b'$ では、下層まで上昇水温が存在しており、水中放水された噴流起因と考えられる鉛直分布の形状を示す一方、沖合での $c-c', d-d'$ では、表層近傍に上昇水温の高温部が存在する表層放水された噴流起因の鉛直分布の形状を示し、汀線近傍と沖合いで分布形が 2 つに分かれており、RUN3 のように鉛直方向の混合が促進される領域が見られなかった。

図 3.15, 図 3.16, 図 3.17 に、RUN5 における水平分布、鉛直分布を、RUN4 と同様に示す。

表層の水平分布図 3.15 をみると、水中放水口の前面で流れに対してフロントが形成されており、表層放水口前面から下流側にかけて、汀線方向に広く拡散する水平分布となった。また、水中放水起因の噴流が場の流れの影響を受けて、表層放水口側に移動するため、 $x-x'$ 断面での各鉛直分布 $a-a' \sim c-c'$ は、水中放水からの噴流による鉛直混合の影響を受けて鉛直方向に混合することが分かる。そして、 $y-y', z-z'$ 断面での各鉛直分布 $a-a' \sim d-d'$ も $x-x'$ 断面の各鉛直分布 $a-a' \sim c-c'$ とほぼ同様の鉛直分布となり、 $x-x'$ と同様の混合形態となったと考えられる。

以上の結果から、場の流れにたいして上流側に表層放水口がある場合、表層放水形式の流速が小さいことから、場の流れの影響は水中放水口前面まで影響し、水中放水口からの噴流も場の流れによって下流側に曲げられる。このような条件では、表層放水の噴流が流れにより下流側に曲げられるのに対し、環境水の連行量が大きい水中放水の噴流も同様に下流側に曲げられることから、相互干渉が生じにくくなると考えられる。

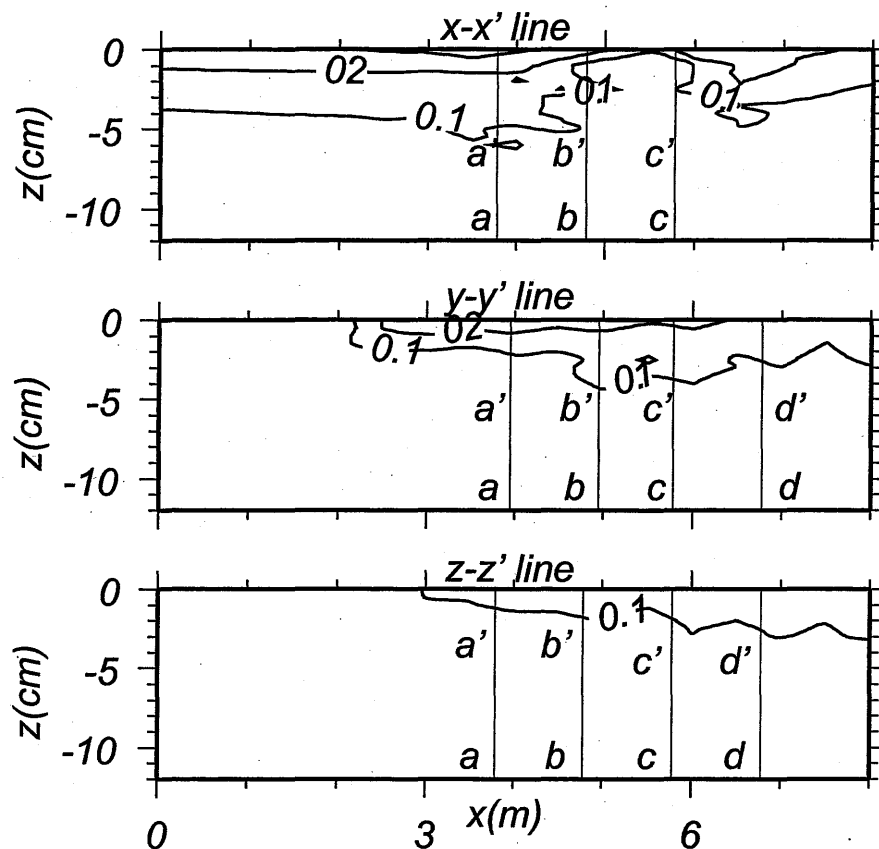
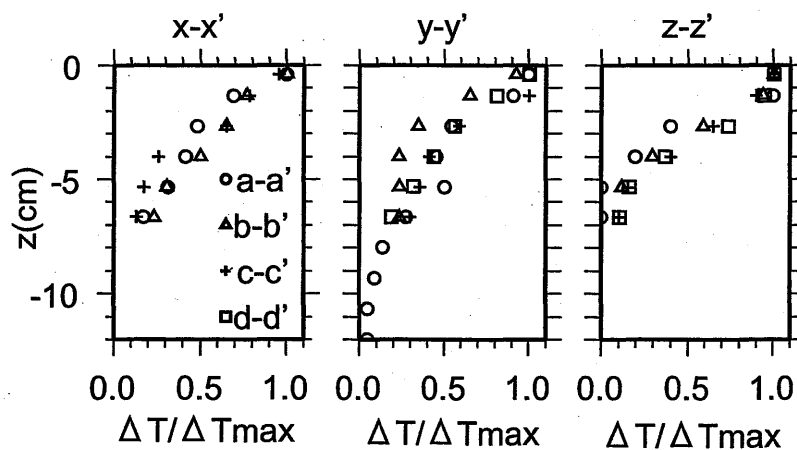

 図 3.16 図 3.15 の $x-x'$, $y-y'$, $z-z'$ line 上の断面での温度上昇率の分布 (RUN5)

 図 3.17 図 3.16 の $a-a'$ ~ $e-e'$ line 上での鉛直分布分布 (RUN5)

表 3.3 計算諸元

項目	諸元
計算範囲 (水中放水口と表層放水口の中心を基準) 放水方向:x 軸, 汀線方向:y 軸	x : 約-2.~10m y : 約-9.2~9.5m z : 0.~24cm
メッシュサイズ	Δx : 2.0cm ~1.3m Δy : 1.5cm ~1.3m Δz : 4mm ~3.9cm
場の粘性・拡散係数	水平: $1\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ 鉛直: $1\text{mm}^2\text{s}^{-1}$
計算時間	1 時間
時間刻み	0.05s

逆に, 場の流れにたいして上流側に水中放水口がある場合, 水中放水形式の流速が大きいことから, 水中放水口前面でフロントが形成されるなど, 場の流れの影響は表層放水口前面海域では小さくなり, 環境水の連行量が大きい水中放水された噴流が, 表層放水された噴流に接近し, 相互干渉が生じやすくなると考えられる。

3.3 3次元数値モデルによる再現計算

前節で示した実験結果のうち, 静止状態に放水するケース RUN1,2,3 について, 前章で示した 3 次元温排水拡散予測モデルを適用し, 密度噴流の表層における拡散現象についてモデルの適用性を検討した。

3.3.1 計算条件

前節で示した静止状態に放水する実験ケース RUN1,2,3 に対して, 3 次元温排水拡散予測モデルによる再現計算を実施した。表 3.3 に計算諸元を示す。また, 図 3.18 に計算範囲および計算点を示す。計算格子は, 水中放水口を y 軸方向に 1 メッシュ, z 軸方向に 2 メッシュで表現できるように最小メッシュを定め, さらに水中放水口 4 本の形状と表層放水口を再現できるように設定した。また, 放水口のある格子では, FAVOR 法における流体占有率を, 水中, 表層放水口の断面積が実験で用いた放水口と等しくなるように設定した。この設定により, 数値解析における放水流量, および熱流量の条件が実験条件と同様となる。

時間刻みを 0.05s と設定した。また, 計算時間は, 実験での定常になるまでの時間が 30 分であったことから, 1 時間まで計算を行った。なお, 計算時間 30 分までの結果と 1 時間までの結果を, 表層での水温の拡散範囲について比較したところ, 上昇水温 1°C のコンターはほぼ同程度であった。

環境水温は T_e を 11°C とし, 放水口での上昇水温 $\Delta T_o = T_o - T_e$ を 7°C としたことから, 放水水温 T_o を 18°C とした。

噴流の放水流速は, 前章と同様に漸増させることとし, 計算開始では 0, 開始後 5 分において実験と同様の流速となるようにした。

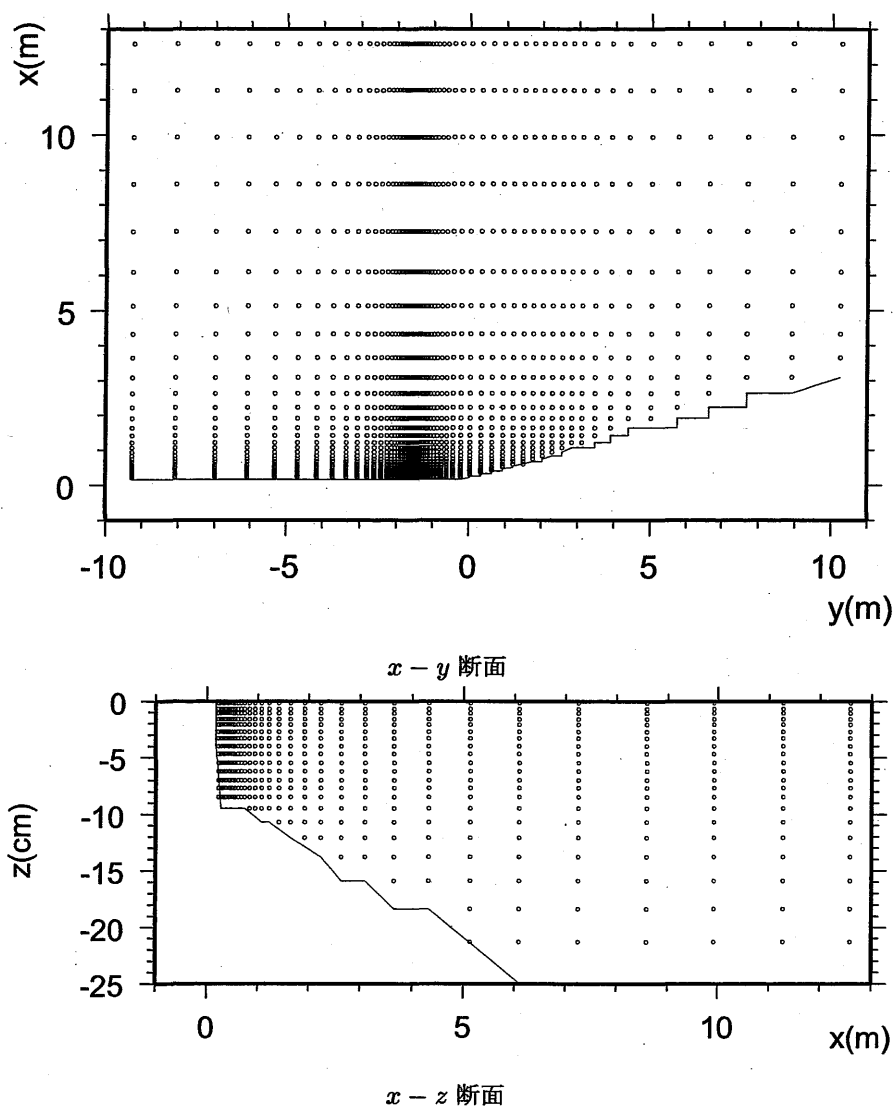


図 3.18 計算格子

表 3.4 に境界条件を示す。境界条件は、2 章と同様に設定を行い、計算を行った。

3.3.2 再現結果と考察

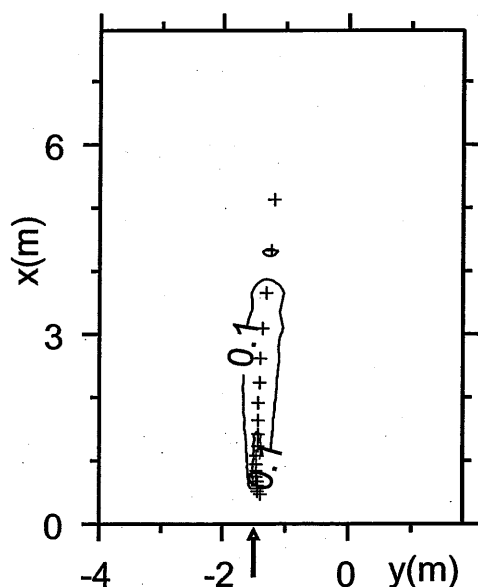
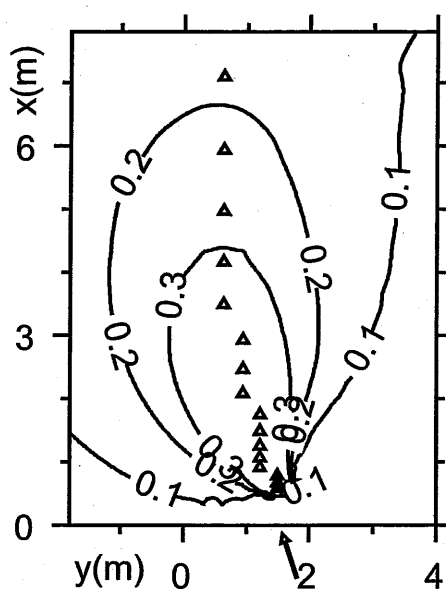
実験ケース RUN1,2,3 に対して、3 次元温排水拡散予測モデルによる再現計算を実施した。本章では、特に、水中放水された密度噴流が水面に浮上した後、および表層放水された密度噴流の水面における拡散形態について、再現性の検討を行った。

(1) 計算結果と実験結果の比較

■水面での拡散範囲 図 3.19, 図 3.20, 図 3.21 に、RUN1(水中放水), RUN2(表層放水), RUN3(水中・表層同時放水) の表層における上昇水温を示す。本図は、前節の図 3.2, 図 3.3, 図 3.4 に対応した図である。そのため、前節と同様、コンターは $\Delta T/\Delta T_0$ を、図中の +, Δ , \circ は汀線に平行な各横断面にお

表 3.4 境界条件

各境界	各変数の条件
放水口	$U = U_0, T = T_0, k = 0.002U^2, \epsilon = C_\mu k^{3/2}/d$
水面	水面：固定, 流速 u, v : ノイマン条件, 流速 $w: 0$ その他のスカラー量: ノイマン条件
底面および側面の境界条件	流速 u, v : フリースリップ条件, 流速 $w: 0$ $k = \epsilon = 0$: フリースリップ条件, 水温: 断熱条件
開境界条件	温度を除く全ての変数: ノイマン条件 水温 T : 流速が計算範囲から外に向かって正のとき, $\frac{\partial^2 T}{\partial n^2} = 0$: 流速が計算範囲から内に向かって正のとき, $T = T_e$

図 3.19 表層での水温上昇率 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布 (RUN1: 水中放水単独の場合)図 3.20 表層での水温上昇率 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布 (RUN2: 表層放水単独の場合)

る上昇水温最大値の位置を示している。

RUN1, RUN2 の計算結果で得られたコンターの形状は、実験結果同様に、RUN1 では横断方向に狭く、小さな範囲で、RUN2 では実験結果よりも若干横断方向に小さくなるものの、RUN1 と比較して横断方向に大きく拡散した形状となった。また、水中・表層同時放水するケース RUN3 でも、実験結果と同様なコンターの形状を示し、両放水口に挟まれた領域において、一定の幅を保ちながら沖合方向に伸びる結果となった。

コンターの値では、RUN3 の水中放水口前面で計算結果が実験結果よりも大きな値となるが、コンターの形状は、全ケースにおいて計算結果が実験結果と同様となっており、計算結果は良好な結果となった。

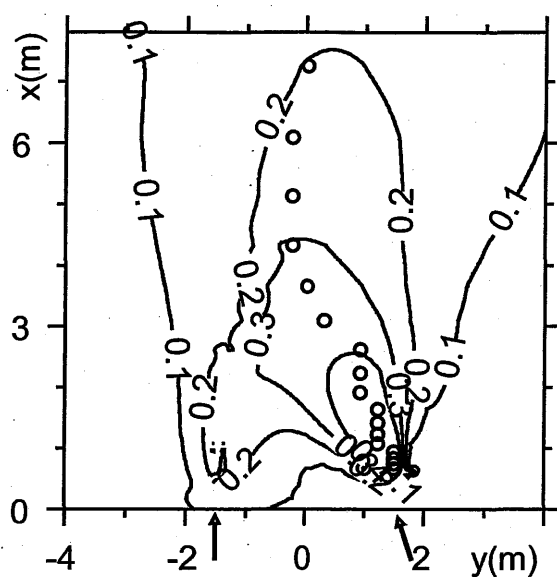
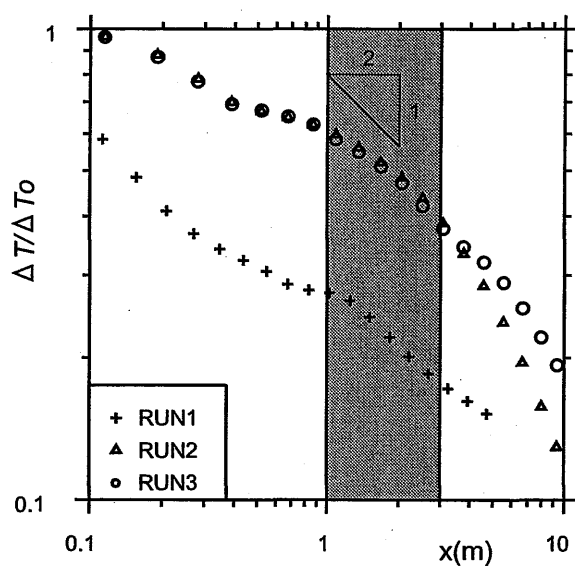
図 3.21 表層での水温上昇率 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布 (RUN3:水中・表層同時放水の場合)

図 3.22 上昇水温の低減率

■上昇水温最大値の経路と水温低減 計算で得られた上昇水温の最大値の位置は、RUN1, RUN2 では実験結果と同様に、放水口前面の結果となった。また、計算された RUN3 の上昇水温の最大値の位置は、放水口の近傍の $x \leq 2\text{m}$ では表層放水の前面に、 $x=3\text{m}$ より両放水口の中心に移動し始め、 $x=4\text{m}$ 以降で両放水口の中心に位置する結果となり、実験結果とほぼ同様な結果となった。

図 3.22 に、図 3.19, 図 3.20, 図 3.21 で示した +, Δ, ○の位置での上昇水温の低減率を示す。図 3.22

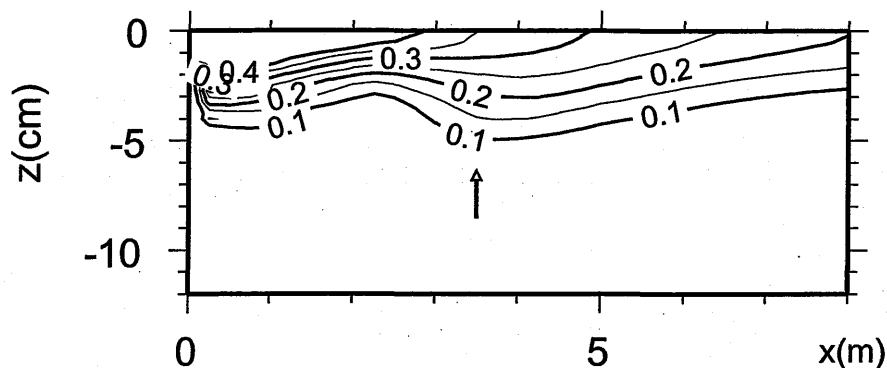


図 3.23 RUN3 の経路上の断面での水温分布

の値は、実験で得られた 3.5 と同様に横軸では放水方向の距離を、縦軸では上昇水温を示している。

RUN1, RUN2 の上昇水温は、実験結果と同様に放水方向に逓減しており、特に $x=1$ までの RUN1 および RUN2 の噴流の発達領域における上昇水温の低減、および $x=1\sim3$ での距離の $-1/2$ で低減していく様子について、計算結果は、実験結果と同様な結果となった。室田ら (1984), (1990), 中辻ら (1991b), および井上ら (1996) が実施した、表層から放水される密度噴流の計算結果においても、本モデルと同様の低減率を示しており、本モデルは良好な再現性を示していると考えられる。

RUN3 の上昇水温の低減結果は、 $x \leq$ 約 3m までは、表層放水のケース RUN2 と同様の逓減特性を示しているが、 $x \approx$ 約 3m 以降で RUN2 よりも低減率が小さくなる。この低減率が小さくなる結果は、実験結果よりも明瞭ではないが、実験結果とほぼ同様な結果となり、各放水口からの噴流が干渉して低減を抑制された実験結果を、本モデルにより再現できたと考えられる。

■経路上の鉛直断面分布 図 3.23 に、図 3.21 に示した○の位置すなわち上昇水温最大の経路上の水温の鉛直分布を示す。放水口近傍における水温の鉛直分布は、実験と同様に温排水が表層で拡散しているが、図上の矢印の地点 ($x=3\sim4$ m) で、実験結果と同様に、水温のコンターが鉛直方向に下がる結果となった。このコンターが下がる様子は、図 3.10 で示した実験結果ほど明瞭には示さないが、実験結果と同様な結果となっており、各放水口からの温排水が相互干渉し、鉛直方向に混合が促進されている様子が、本モデルにおいても再現できた。

(2) 再現性の考察

前項において、水中放水口・表層放水口から放水された密度噴流の表層における拡散現象を対象に、表層における水温の平面分布および水温の低減率について、水理実験結果と計算結果とを比較することにより、数値モデルにおける再現性の検討を行った。その結果、水中放水単独および表層放水単独のケースでの計算結果は、表層における水温の平面分布および低減率について、水理実験結果とよく一致した。そして、水中・表層同時放水するケースにおいても、表層における水温の平面分布および低減率について、計算結果が水理実験結果とほぼ一致しており、さらに、水中放水起因の温排水と表層放水起因の温排水が相互干渉し、水温の低減率が抑制される位置や鉛直的に混合する様子についても、計算結果は、実験結果に対し、良好な結果となった。

以上の結果、および前章の結果より、水中放水口から表層に浮上するまでの放水口近傍、および浮上し

た後の表層における温排水の拡散現象について、本モデルが良好な再現性を示したことから、本モデルを用いて、水中放水される温排水の拡散範囲を予測することが可能であると考えられる。

中辻ら(1991b)は、密度差に起因する水面変動が表層密度噴流の広がり過程に重要な意味をもつと指摘し、静水圧近似を仮定した準3次元モデルを使用して計算している。特に内部フルード数が小さい場合は、噴流としてよりもプルームとして拡散し、横断方向の拡散が大きくなることを示している。

本モデルでは、水面を固定し、静水圧近似を仮定しない3次元モデルを使用したことから、水面変動を再現することが出来ない。しかし、表層放水単独の計算結果は、横断方向の広がりが若干小さくなるものの、実験結果とよい一致を示した。これは、本研究で対象とした表層放水口での内部フルード数が5と大きく、温排水がプルームよりも噴流として拡散することが原因と考えられる。中辻らもフルード数が大きくなるほど、水面変動が小さくなる結果を示しており、内部フルード数が大きい場合では、本モデルで表層放水される温排水を計算できることが示唆される。ただし、本モデルの適用が許される内部フルード数の大きさの検討は、今後の課題と考えられる。

表層水中同時放水の温排水の表層での拡散では、水中放水された温排水が浮上した後でも流速が大きいことから、実験結果および計算結果において、横断方向の広がりが表層放水単独の結果よりも抑制されており、表層での温排水の拡散現象は、水中放水の影響を大きく受けていると考えられる。このような結果から、前章および本章で示した3次元温排水拡散予測モデルは、水中放水・表層放水が近接設置された発電所での温排水の拡散範囲予測について、水中放水される温排水の拡散範囲予測と同様に、適用が可能であると考えられる。

3.4 クラスター分析を用いた拡散形態の検討

3.2.2で示した水中・表層同時放水を行う噴流の水理実験により、上昇水温の水平分布は各放水口から単独で放水される噴流と異なる分布となり、鉛直分布では水中・表層放水口からの噴流が相互干渉する領域内で、各放水形式で単独に放水された噴流の鉛直分布とは異なる鉛直分布を示す。

本節では、温排水の拡散形態を示す上昇水温の水平・鉛直分布を併せて解析を行うことを目的に、水理実験結果および計算結果で得られた水温の鉛直分布を分類し、これら分類された鉛直分布について解析を行った。

3.4.1 クラスター分析の概要

水理実験で扱ったRUN1からRUN5までの水温測定点は1000点程度あり、また計算結果で扱ったRUN1からRUN3までの計算点は膨大となる。得られた鉛直分布を分類するための明確な指標が無いことから、自動的・客観的に分類を行うことが出来る一般的なクラスター分析[宮本,1999]を用いた。

クラスター分析は、複数の要素を持つ観測結果に対し相関を計算し、その相関の距離で観測結果の分類を行う方法である。クラスター分析の詳細は、以下のとおりである。

個体を X_k^p と示す。ここに、 k を個体数、 p を要素数とする。そして、各個体 $x_i^i, x_j^j \in X$ の類似度をユークリッド平方距離 $d_{ij} = \sum_{l=1}^p (x_i^l - x_j^l)^2$ で定義し、この類似度を用いて各個体間の距離を比較して、クラスターを逐次結合する。

具体的なクラスター分析の計算は、以下の手順でおこなった[宮本,1999]。

(第一段階) n 個の個体を n 個のクラスターがあるとして、各クラスター間のユークリッド距離を計算する。

(第二段階) ユークリッド距離のもっとも近いクラスターを併合して、1つのクラスターとする。新たにできたクラスターから他のクラスターまでの距離を計算する。

ここに、クラスター a と b が併合されて、クラスター c が作られたとする。そして、 d_{ab}, d_{xa}, d_{xb} がクラスター a, b が併合される前のクラスター x との距離とすると、併合後のクラスター c との新しい距離は次式で表される。

$$d_{xc} = \alpha_a d_{xa} + \alpha_b d_{xb} + \beta d_{ab} \quad (3.1)$$

本クラスター分析では、ウォード法を用い、定数 $\alpha_a, \alpha_b, \beta$ はそれぞれ $(n_x + n_a)/(n_x + n_c), (n_x + n_b)/(n_x + n_c), -n_x/(n_x + n_c)$ とする。ここに $n_{a,b,c,x}$ はクラスター a, b, c, x に含まれる個対数である。

(第三段階) 1つのクラスターになれば終了し、1つのクラスターになるまで、(第二段階)に戻る。

3.4.2 水理実験結果への適用

まず、表 3.2 の全ケース RUN1~5 までの水温の鉛直分布の結果を最大水温により正規化し、全ケースの全鉛直分布についてクラスター分析を適用して鉛直分布の分類を行った。次に、分類された鉛直分布を用いて、3.2.2 と同様に静水状態から放水を開始するケース RUN1,2,3 における温排水の拡散形態、挙動の検討を行い、さらに、流れのある場合でのケース RUN4,5 の拡散形態について検討を行った。

(1) クラスター分析に用いた鉛直分布

鉛直分布の最大温度上昇率 $\Delta T/\Delta T_0$ が 0.1 以上の値を持つ鉛直分布を個体 X に、各個体の $z = -0.5, -1.3, -2.6, -4., -5.3\text{cm}$ (実験スケール), $-0.6, -2., -4, -6, -8\text{m}$ (実スケール) の水温データを最大温度上昇率で正規化した値を要素として、クラスター分析を行った。また、要素として用いた実験結果が実スケールで -8m までと、水理実験(水中放水)で報告されている層厚 ($-10 \sim -20\text{m}$) に比べて短いことから、 -10m 以上の層厚を持つ実験結果の確認のため、および分類されたクラスターの指標とするために、3.2.2 において鉛直分布の形状として用いた Gauss 曲線: $\Delta T/\Delta T_{max} = \exp -(z/h_0)^2$ で近似した水温分布も、実験結果とあわせてクラスター分析を行った。ここに、 h_0 は温水層厚を示す。クラスター分析で用いた Gauss 曲線は、 h_0 を実スケール水深 $2, 3, \dots, 19, 20\text{m}$ とした、計 19 個の鉛直分布である。

(2) クラスター分析で得られた樹形図および分類された鉛直分布の形状

図 3.24 にクラスター分析で得られる樹形図を示す。樹形図は、クラスター分析における各クラスターの分岐とクラスター間の距離を示し、縦軸が距離を示している。そして、この距離が大きいほど、各クラスター間の近似度が低いことを示している。

図中の最上部において一つのクラスターとなっており、下側に向けて順に分岐した図となっているが、クラスター分析では、この分岐した場所において 2つのクラスターが結合され、分岐した位置の縦軸がク

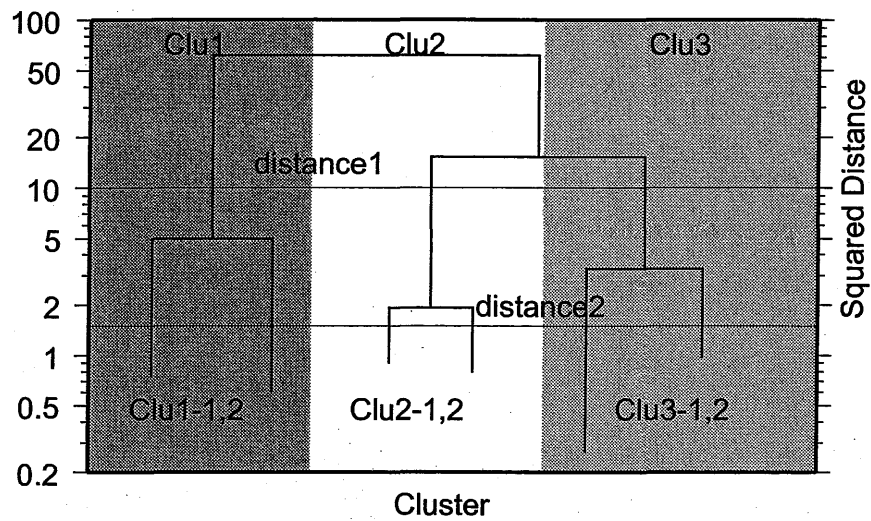


図 3.24 クラスタ分類で得られた樹形図

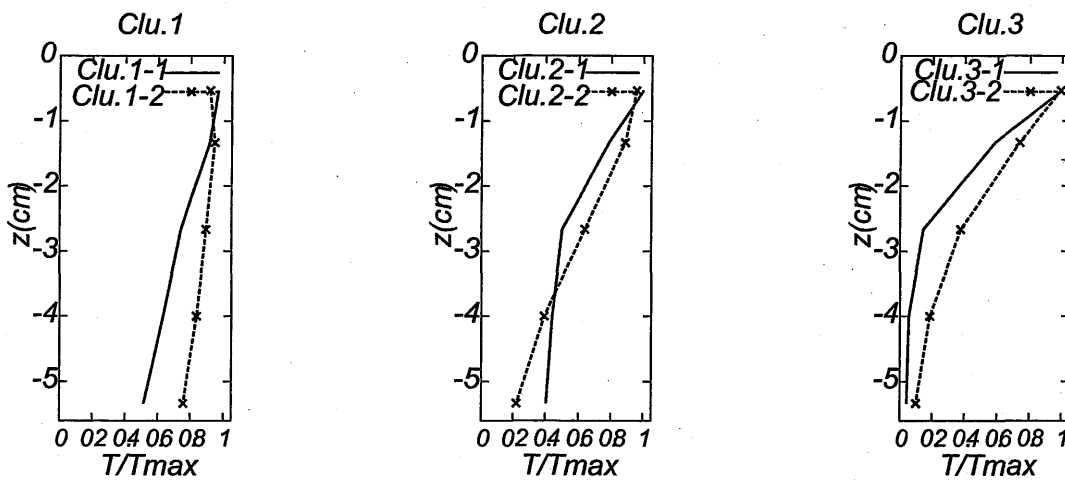


図 3.25 図 3.24 の各クラスター Clu-1,2,3 の平均鉛直分布

表 3.5 各クラスターに含まれる鉛直分布

クラスター	Clu1-1/1-2	Clu2-1/2-2	Clu3-1/3-2
RUN 1	9/15	0/0	0/0
RUN 2	0/0	0/20	63/30
RUN 3	76/66	49/27	3/42
RUN 4	38/27	6/12	53/39
RUN 5	14/29	35/54	17/67
h_o	7~9m/10~20m	無し/4m~6m	2m/3m

ラスター間の距離となる。

樹形図において、ある距離の値を設定して樹形図をその値で区切ると、観測結果はいくつかのクラスターに分類される。ここで、樹形図から、生物学で示される進化の過程の図のような印象を受けるが、これは遺伝子解析においても、クラスタ分析と類似の解析が行われているためであり、本解析においても、鳥類、哺乳類などと生物学において分類するように、鉛直分布の分類を行う。

樹形図 3.24 より、最上部でクラスター Clu1 と Clu2,3 に分岐し、その次に Clu2 と 3 に分岐し、各クラスターの距離 distance1 で区切ると図中で色分けされたように、測定結果は Clu1,2,3 の 3 つに分類される。さらに、樹形図を各クラスターの距離 distance2 で区切ると、各 Clu1,2,3 で 2 つずつに分けられる。

図 3.24 において、距離 distance2 で分類した Clu1,2,3-1,2 の鉛直分布に対し、平均値を計算した。図 3.25 に、各クラスター Clu1,2,3 の平均水温の鉛直分布を示す。

クラスタ分析より分類された鉛直分布は、上昇水温が鉛直方向に一樣となる分布 (Clu1-1,2)、表層で高くなり、鉛直方向下向に徐々に水温が低下する分布 (Clu3-1,2)、および両者の中間にあたる分布 (Clu2-1,2) を示した。

Clu1-1,2, Clu3-1,2 では、それぞれの 2 つの鉛直分布がほぼ同様な分布を示すが、Clu2 では、2 つの鉛直分布が若干異なり、Clu2-1 で分類される鉛直分布が、鉛直下向きに滑らかに低減する分布とはならず、表層から鉛直方向に低減していた水温が、-2 から -3cm の間で急に折れ曲がり、Clu1 と Clu2 の鉛直分布の線形和のような分布となっている。

表 3.5 にクラスター分析により分類された各実験結果の個体数を示す。ここに表中には、鉛直分布の指標として、観測結果と同時にクラスター分析した Gauss 曲線の層厚 h_0 も追加して示した。

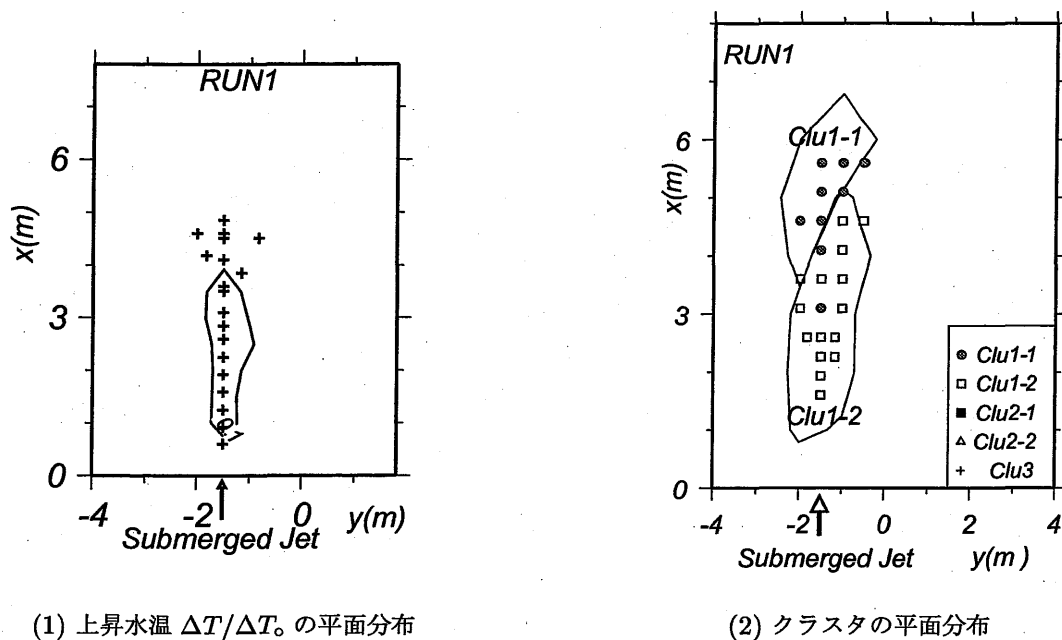
指標である Gauss 曲線の層厚は、層厚 7~20m がクラスター Clu1 に、層厚 4~6m が Clu2 に、層厚 2~3m が Clu3 に分類された。また、クラスター分析に用いた観測結果の要素は深度 8m までとしたのにも関わらず、9m 以上の層厚を持つ Gauss 分布では、層厚 7~9m の分布が Clu1-1 に、層厚 10~20m の分布が Clu1-2 に分類されており、計測水深よりも大きい層厚をもつ鉛直分布にたいしてもクラスター分析で分類できるという、興味深い結果が得られた。

水中・表層同時放水された鉛直分布群では、Clu1,3 以外に Clu1 と 3 の中間である Clu2 の分布が存在する。また、Clu2 をさらに 2 つに分類した結果の Clu2-2 は、表層単独放水実験 (RUN2) において存在しているが、Clu2-1 は、水中・表層単独放水 RUN1,2 中には存在せず、同時放水された RUN3,4,5 でしか見られない結果となった。さらに、Clu2-2 では、指標として同時にクラスター分析した Gauss 曲線が分類されるのにたいし、Clu2-1 では、この Gauss 曲線が分類されなかった。このような結果から、分類された Clu2-1 は、水中・表層同時放水された際に生じる特殊な分布であると推察される。

(3) 分類された鉛直分布の平面分布

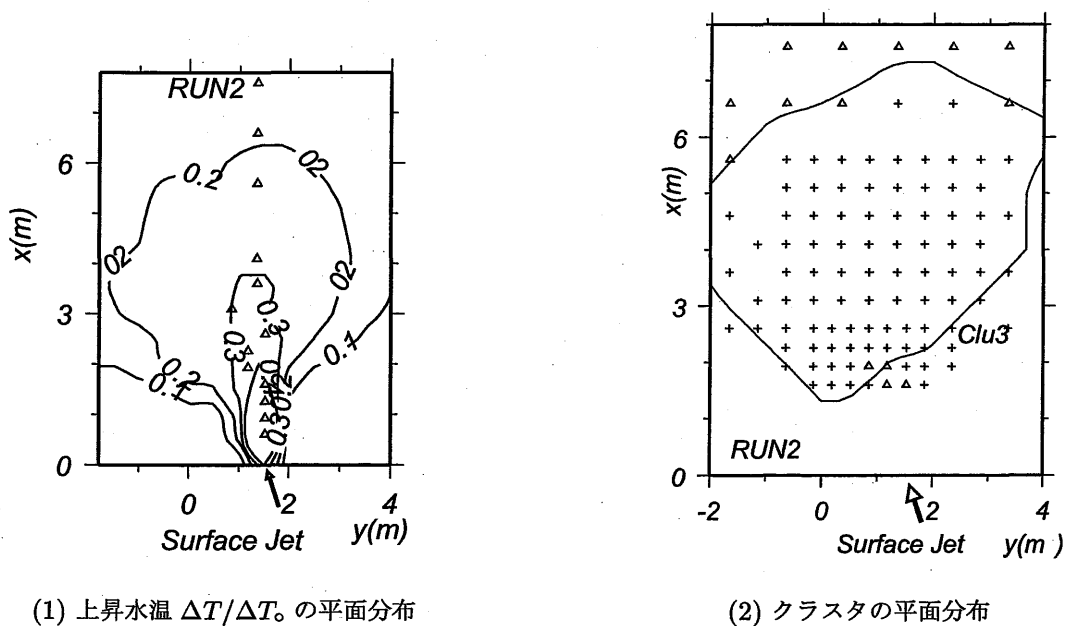
■水中放水・表層放水混在場での拡散特性 (場の流れ無し) 図 3.26 に、水中単独放水 (RUN1) の上昇水温 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布および汀線に平行な各横断面における上昇水温最大値の位置 (○等)、およびクラスター Clu1-1,1-2,2-1,2-2,3 の平面分布を示す。また、図 3.27 に、表層単独放水 (RUN2) の平面分布を示す。ただし、図の繁雑化を避けるため、Clu3-1,3-2 は一つのクラスターとして、Clu3 とした。

RUN1(水中放水単独)では、上昇水温が放水口前面に細長く拡散する領域において、鉛直方向に一樣な分布を示した Clu1 が分布した。

(1) 上昇水温 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布

(2) クラスターの平面分布

図 3.26 水中単独放水 (RUN1) の平面分布

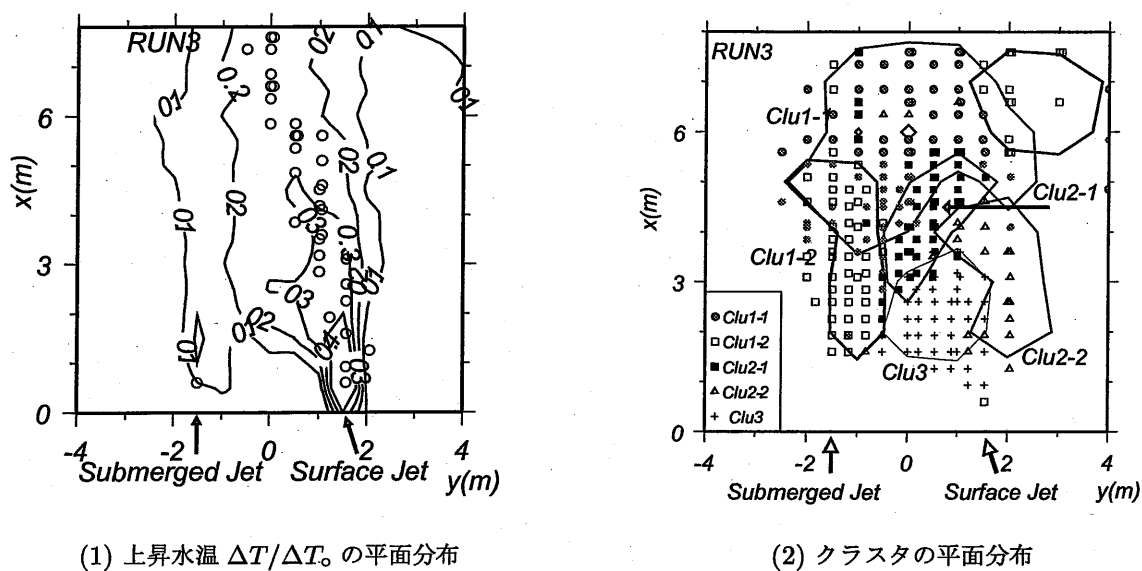
(1) 上昇水温 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布

(2) クラスターの平面分布

図 3.27 表層単独放水 (RUN2) の平面分布

RUN2(表層放水単独)の上昇水温では、放水口前面より放射上に拡散する領域のうち放水口前面および沖合いを除いた領域において、Clu3の鉛直分布(上層で高く鉛直方向に低減する分布)となった。また、RUN2でのクラスターの平面分布のうち、放水口前面および沖合い領域において、Clu2-2(Clul,3の中間の分布)となる領域が見られるが、これは、放水口前面では放水直後の表層噴流が発達する過程で鉛直方向に希釈・混合したため、沖合い領域では境界壁の影響のためと考えられる。

図 3.28 に、RUN3 の上昇水温 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布および汀線に平行な各横断面における上昇水温最

(1) 上昇水温 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布

(2) クラスターの平面分布

図 3.28 水中・表層同時放水 (RUN3) の平面分布

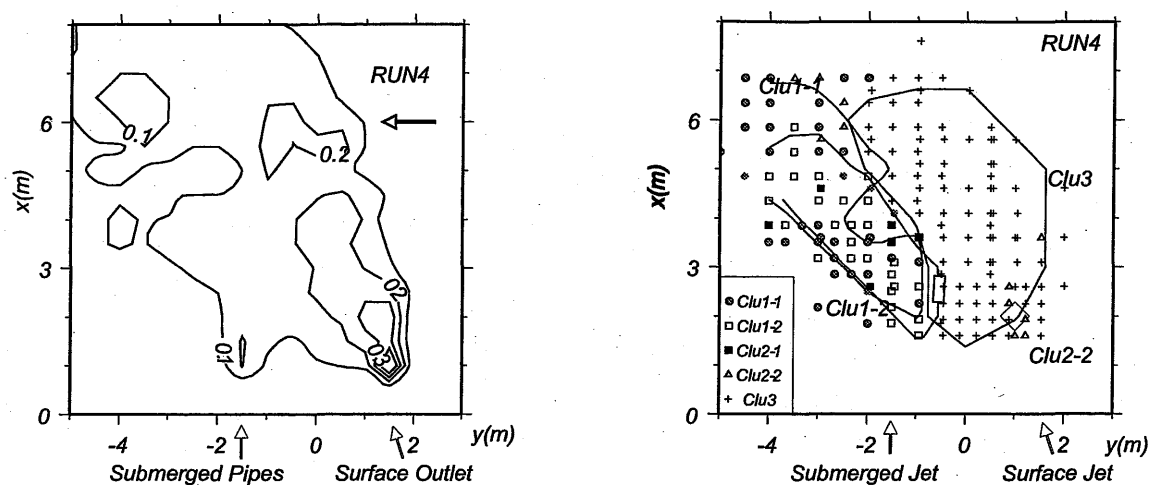
大値の位置 (○等) と、クラスター Clu1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 3 の位置を示す. 3.2.2 で示したように, 表層・水中同時放水したケース RUN3 の水平分布では, $\Delta T/\Delta T_0 = 0.1, 0.2$ のコンターが, 両放水口に挟まれた領域で一定の幅を保ちながら沖合方向に伸びる傾向にある. この両放水口に挟まれた領域では, 水中放水口近傍において Clu1-2 (Gauss 分布では温水層厚 $h_0 = 10 \sim 20\text{m}$ が分類されたクラスター) が, また表層放水口近傍において Clu3 (Gauss 分布では温水層厚 $h_0 = 2 \sim 3\text{m}$ が分類されたクラスター) で分類された鉛直分布が存在し, 各放水口から単独放水する鉛直分布と類似した形状となった. しかし, 表層放水口の前面海域での鉛直分布は Clu2-2 と分類され, この領域において Clu3 よりも鉛直方向に混合している結果となった. これは, 3.2.2 で説明をしたように, 水中放水された温排水による周囲水の連行の結果, 鉛直方向に混合したためと考えられる.

この両放水口で挟まれた領域での, 水中放水口側 (約 $3\text{m}, -0.5\text{m}$) から表層放水口側 (約 $5\text{m}, 1\text{m}$) までを斜めに結ぶ領域において, 鉛直分布は Clu2-1 となり, Clu2-1 の領域より沖合いでは, Clu1-1 で分類された鉛直分布となった. 3.2.2 での上昇水温の低減率の図 3.5 では, Clu2-1 の領域付近 $x = 4\text{m}$ で低減率が悪くなっており, この領域では, 水中・表層放水の各噴流が相互干渉し, 鉛直方向に混合が促進されていることが分かる.

■場の流れを考慮した場合 図 3.29 に RUN4 の, 水温上昇率の水平分布, 各クラスターの水平分布を示す. 同様に, 図 3.30 に RUN5 の水平分布, 各クラスターの水平分布を示す.

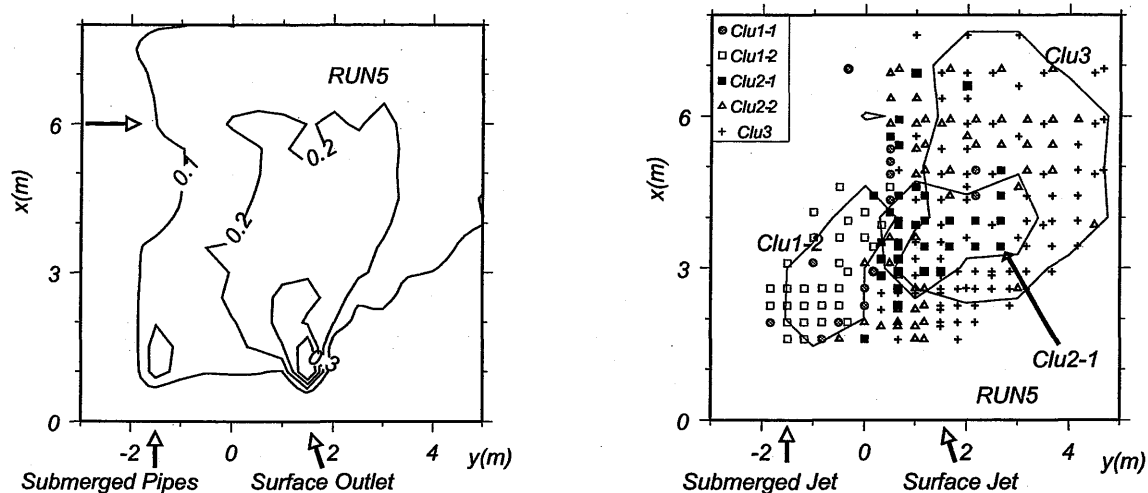
3.2.2 で示した水温上昇率による水平分布 (図 3.29, 3.30) をまとめると, RUN4 においては, 表層放水口から放水された噴流が, 場に与えられた流れにより曲げられ, 水中放水からの噴流とはほとんど相互干渉せずに, 水中放水の浮上する海域のまわりを反時計回りで, 沖合に拡散する. また, RUN5 では, 水中放水口の前面で流れに対してフロントが形成され, 水中・表層放水された噴流が相互干渉したのち, 汀線方向に拡散する.

図 3.29, 3.30 の各クラスターの平面分布をみると, RUN4 では, 流れにより曲げられた表層放水起因の噴流が Clu3 に属する鉛直分布となる. また, 水中放水起因の噴流は, Clu1 に属する鉛直分布となり, 各

(1) 上昇水温 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布

(2) クラスターの平面分布

図 3.29 同時放水・流れあり (RUN4) の平面分布

(1) 上昇水温 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布

(2) クラスターの平面分布

図 3.30 同時放水・流れあり (RUN5) の平面分布

噴流の相互干渉を示す Clu2 の鉛直分布は、ほとんど見られない結果となり、3.2.2 の考察結果と同様な結果となった。

これに対し、RUN5 では、RUN4 に比べて鉛直分布が Clu2 で分類される地点が多く観測された。これは、3.2.2 の考察でも述べたが、水中放水起因の噴流が場の流れの影響を受けて、表層放水口側に移動したため、そして水中放水の噴流が表層放水の上流側でフロントを形成し、表層放水起因の噴流が、流れに曲げられることなく拡散するため、表層放水起因の温排水が水中放水の噴流の影響を受けやすくなったためと考えられる。

場に流れのある RUN4,5 の鉛直分布の変化を把握するには、RUN3 のように、各放水口に挟まれた領域を検討するだけでなく、さまざまな $x-z$, $y-z$ 断面を検討する必要がある。しかし、クラスターで鉛

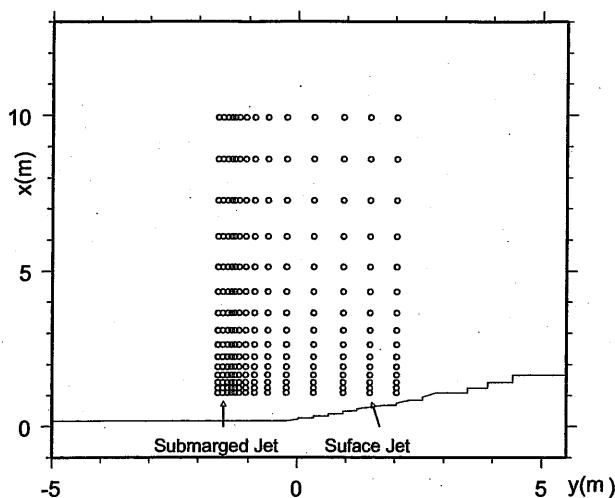


図 3.31 クラスタ分析をしたメッシュ

直分布の判別を行うと、各放水口からの噴流が支配的な領域、相互干渉する領域、相互干渉の後、噴流が発達し、鉛直方向に混合している領域が平面的に解析することが出来る。基本的に密度噴流の形態を表す成分が、鉛直分布と上昇水温であることを考慮すると、クラスター分析は、密度噴流の拡散形態を理解する上で有効な手段であると考えられる。

3.4.3 計算結果への適用

計算を行ったケース RUN1~3 までの水温の鉛直分布の結果について、実験結果と同様にクラスター分析を行い、鉛直分布の分類を行った。

(1) クラスタ分析に用いた鉛直分布

図 3.31 にクラスタ分析を行った鉛直分布の位置を示す。計算点数が膨大であったことから、偶数番号の計算点を選択し、これら計算点のうち、表層での上昇水温が 1.5°C 以上の計算点を個体として、表層から約 10cm までの鉛直分布についてクラスタ分析を行った。なお、鉛直分布は前項の実験結果で行ったのと同様に、最上層の上昇水温により正規化した分布とした。さらに、分類された鉛直分布の指標として、実験での分析と同様に、以下の式で示される Gauss 分布の実スケール水深 h_0 を 1m から 20m と 1m ずつ変化させた鉛直分布についても、計算結果とあわせてクラスタ分析した。

$$\Delta T / \Delta T_{max} = \exp -(z/h_0)^2$$

(2) クラスタ分析で得られた樹形図および分類された鉛直分布の形状

図 3.32 に、計算結果の鉛直分布をクラスタ分析した結果の樹形図を示す。樹形図を見ると、鉛直分布は、まず CI-1 と CI-2,3 に分けられ、その後に CI-2 と CI-3 に分けられる。その後、CI-1,2,3 において 2 つに分けられる結果となった。

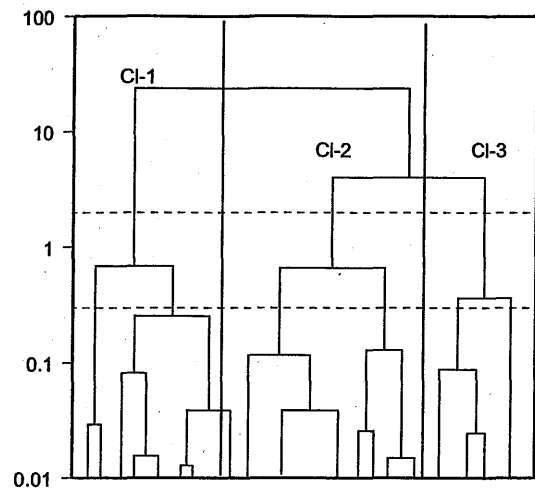


図 3.32 計算結果の樹形図

表 3.6 各クラスターに含まれる鉛直分布

クラスター	Cl-1.1/-1.2	Cl-2.1/-2.2	Clu-3.1/-3.2
RUN 1	5/26	2/4	0/0
RUN 2	0/0	0/0	35/23
RUN 3	6/53	38/8	19/26
h_0	16~20m/8~13m	5,6m/7m	1,2m/3,4m

図 3.33 に、クラスタ分析により分類された各クラスター Cl-1, Cl-2, Cl-3 の平均鉛直分布を示す。また、表 3.6 に実験ケース RUN1,2,3 の結果のうち、各クラスター Cl-1, Cl-2, Cl-3 に分類された数を示す。

Cl-1 で分類された鉛直分布は、鉛直方向に深く混合する分布を示し、 h_0 を 8~20m とした場合の Gauss 分布と同じ分布に分類された。また、Cl-2 に分類された鉛直分布は、表層で高温となる分布を示し、 h_0 を 1~4m とした場合の Gauss 分布と同じ分布に分類された。Cl-2 で分類された鉛直分布は、Cl-1 と Cl-2 の中間に鉛直分布を示し、Cl-1, Cl-2 の中間にあたる、 h_0 を 5~7m とした場合の Gauss 分布と同じ分布に分類された。

水中放水で放水された噴流 (RUN1) の鉛直分布の大多数が Cl-1 に分類され、表層放水 (RUN2) された温排水の鉛直分布は Cl-3 に分類され、前項での結果と同じように分類されている。また、水中・表層同時放水された温排水 (RUN3) の鉛直分布は、Cl-1,2,3 で分類され、RUN1,2 と異なり、Cl-2 で分類された鉛直分布が各噴流で挟まれた領域に存在することを示した。以上の結果から、水中放水された温排水が浮上して表層で鉛直方向に拡散する様子や、表層放水された温排水が表層で拡散している様子が、数値モデルにより再現されていることが分かる。

実験結果と異なる点は、実験結果では Gauss 分布と同じクラスターに分類されない鉛直分布が RUN3 で実測された分布に存在したのに対し、計算結果では鉛直分布が Gauss 分布と同じクラスターに分類されたことである。これは、数値解析で得られた鉛直分布が、実験結果と比較して、滑らかとなって Gauss 分布に近い形状となるためと考えられる。

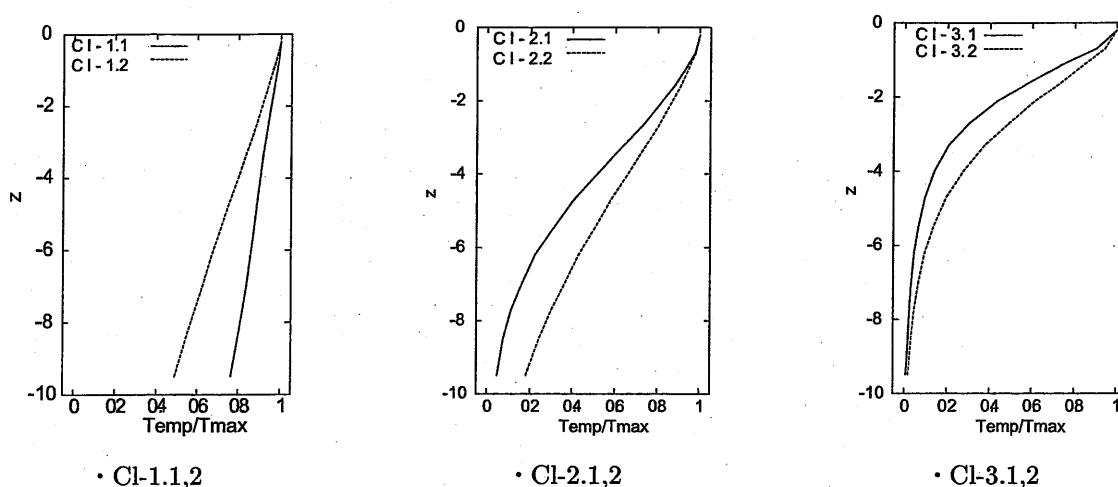


図 3.33 クラスター CI-1, CI-2, CI-3 に分類された平均鉛直分布

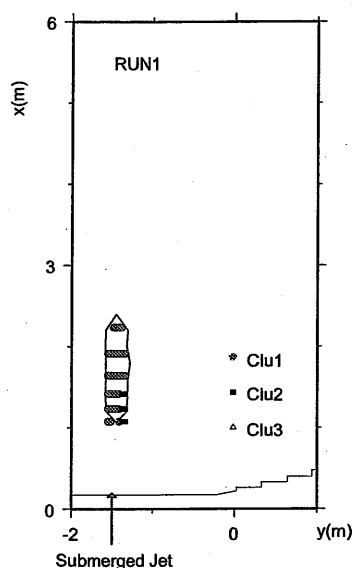


図 3.34 RUN1(:水中放水単独の場合) における各クラスター CI-1,2,3 の平面分布

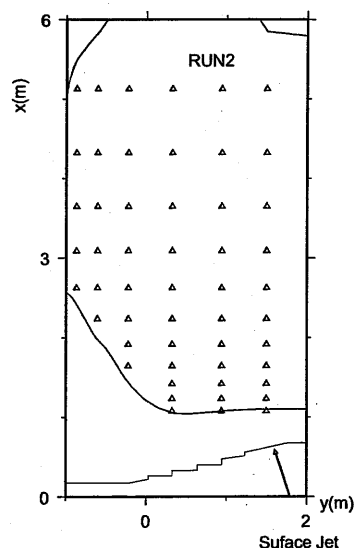


図 3.35 RUN2(:表層放水単独の場合) における各クラスター CI-1,2,3 の平面分布

(3) 分類された鉛直分布の平面分布

図 3.34, 3.35, 3.36 に RUN1,2,3 の各クラスター CI-1,2,3 の平面分布を示す。

1℃以上の領域において、RUN1 では鉛直方向に深く混合を示す CI-1 で分類された鉛直分布が、RUN2 では表層に高温域が存在する CI-3 で分類された鉛直分布が存在する。これは、実験と同様の結果となっており、本モデルが各放水形式で放水される温排水の鉛直方向の拡散形態を再現できていることが分かる。

RUN3 では、水中放水口の前面では CI-1 で分類された鉛直分布が、表層放水口の前面では CI-3 で分類された鉛直分布が存在し、CI-1,3 の間に挟まれた領域では CI-2 で分類された鉛直分布が存在し、実験結

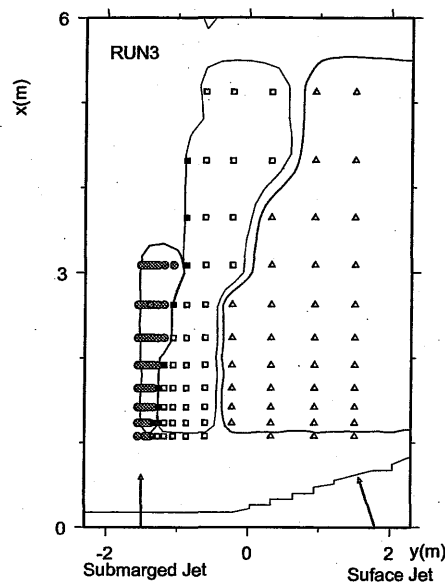


図 3.36 RUN3(水中・表層同時放水の場合)における各クラスタ C1,1,2,3 の平面分布

果とほぼ同様な結果となった。しかし、計算結果では、水中放水起因と表層放水起因の噴流が相互干渉した以降遠方での鉛直分布は、実験結果よりも深く混合をしない結果となった。これは、前述したとおり、本数値モデルで得られた鉛直分布が実験結果よりも滑らかになる傾向を示すことが原因と考えられる。この点を除くと、各放水口からの噴流の鉛直分布、および各噴流の相互干渉跡の鉛直分布の平面分布について、本モデルの再現性は良好であると考えられる。

3.5 まとめ

本研究では、水中・表層放水口から同時放水される密度噴流の拡散挙動の把握を対象に、水理実験および数値モデルによる検討を行った。

水槽内に一様な汀線を持つ海域を作成し、水中放水口と表層放水口をほぼ平行に近接設置した条件とした場合における、噴流の拡散形態を水理実験によって把握した。水理実験においては、静止場に噴流を水中単独放水、表層単独放水・水中・表層同時放水する場合について拡散実験を行い、表層における噴流の拡散する領域について水温計測を行い、単独放水した場合と同時放水した場合の拡散挙動の検討を行った。さらに模型水槽内で汀線方向に一様な流れ場を作成し、温排水を水中・表層同時放水する水理実験を行い、海域の流れの影響について検討を行った。

次に、前章で述べた3次元数値モデルを静止場に温排水を放水した実験結果に適用し、表層における水温の分布、低減率についての比較検討を行い、本モデルの再現性・適用性の検討を行った。

最後に、水理実験および数値計算で得られた水温の鉛直分布について、クラスタ分析を行い、水中・表層同時放水された温排水が重合する領域における、鉛直分布の分類をおこない、鉛直分布の形態について考察を行った。

得られた成果を以下にまとめる。

1. 水理実験により得られた結果

- 水中、表層放水口から同時放水された密度噴流の表層での水温分布は、各々の放水口から単独放水される噴流と異なり、汀線方向に拡散せず、沖合方向に帯状に拡散する。
- 上昇水温の最大値の位置は、初期段階においては表層放水口の前面にあるが、沖合方向に進むにしたがって、両放水口内側に移動し、最終的に両放水口の中心線上に移動する。
- 上昇水温最大値の経路上における上昇水温の低減率は、距離に対して $-1/2$ 乗の勾配で低減するが、一時的に希釈が悪くなる位置があり、その後は、 $-1/2$ 乗で低減する結果となった。この希釈が悪くなる位置は、上昇水温最大値の経路が表層放水口前面から、両放水口の内側に移動する領域であることから、水中・表層放水口からの噴流が相互干渉した結果、希釈が悪くなったと考えられる。
- 水中、表層放水口からの噴流が相互干渉し、上昇水温最大値の希釈が一時的に悪くなる位置以降での鉛直分布は、水中放水の噴流の影響により下層側から鉛直的な混合が促進され、表層放水の噴流の鉛直分布が水深方向に深い層厚となる。
- 表層放水口からの噴流が場の流れに対して上流側にある場合、表層放水および水中放水からの噴流の相互干渉が弱くなる。逆に水中放水口からの噴流が場の流れに対して上流側にある場合は、表層放水および水中放水からの噴流の相互干渉が強くなる。このように水中、表層放水口から同時放水された拡散形態は、汀線方向の流れの方向により異なり、場の流れに応じた両放水口の配置を考慮することが必要である。

2. 数値計算により得られた結果

- 水中放水される密度噴流が水面に浮上した後の表層での拡散形態について、計算結果は実験結果とよい一致を示した。前章および本章の結果により、本モデルを用いて、水中放水される温排水の拡散範囲を予測することが可能であると考えられる。
- 2章で構築したモデルは、水面を固定端と仮定し、非静水圧近似で計算しているため、水面変動が計算できないが、内部フルード数が大きな条件の放水口の場合では、表層密度噴流でも適用できることが示唆された。
- 近接設置された水中・表層放水口から同時放水される密度噴流は、内部フルード数の大きい水中放水からの噴流の影響が大きいことから、水中放水される密度噴流と同様に本モデルの適用が可能であると考えられる。

3. クラスタ分析により得られた結果 (実験結果)

- クラスタ分析により、客観的に大量の測定された鉛直分布を分類することが出来た。そして計測水深よりも大きな層厚を持つ鉛直分布にたいしてもクラスター分析により分類が可能であることが確認できた。
- 分類された鉛直分布を用いることにより、温排水の拡散形態を表す指標である水温の鉛直分布の状態を面的に知ることが出来、静止場・流れありの条件での各放水形式で放水される噴流が相互干渉し、鉛直的に混合する領域を特定することが出来た。
- クラスタ分析により分類された鉛直分布は、各放水形式の影響による鉛直分布と水中・表層同時放水された場合に生じる鉛直分布との三つに分類できた。
- 単独放水での鉛直分布は、水中放水された噴流では層厚 10m 以上のガウス分布、表層放水さ

れた噴流では層厚 6m 以下のガウス分布と同じクラスタに分類された。

- 同時放水された場合に生じる鉛直分布は、表層単独放水および水中単独放水で得られた分布の中間の層厚 7~9m を持つ Gauss 分布、および Gauss 分布とは異なる分布の二つに分けられる。これらの鉛直分布は、各放水口の内側に存在しており、Gauss 分布とは異なる分布が放水口に近い領域で、それ以降では表層単独放水および水中単独放水で得られた分布の中間の層厚を持つ Gauss 分布が存在した。
- Gauss 分布と異なる鉛直分布が、水中放水と表層放水された噴流が相互干渉することにより生じると考えらるることから、各放水口からの噴流が重合して、相互干渉する領域をクラスタ分析により特定できたと考えられる。この領域以降での鉛直分布は、水中放水の噴流の影響により下層側から鉛直的な混合が促進されたため、それ以前の分布よりも深くまで混合し、層厚 7~9m の Gauss 分布で示される分布に発達することが確認された。

4. クラスタ分析により得られた結果 (計算結果)

- 計算結果で得られた鉛直分布は、実験結果と同様に、各放水形式の影響による鉛直分布と水中・表層同時放水された場合に生じる鉛直分布との三つに分類できた。
- 水中表層放水同時放水された場合での、各噴流が重合する領域では、計算結果が実験結果と比較して滑らかな結果となる傾向がみられるが、干渉した後に層厚 7~9m の Gauss 分布に発達する領域については、計算結果においてもほぼ同様な結果となっており、各放水形式で放水された噴流が干渉して発達する領域について、数値モデルは解析可能であることが示された。

水理実験・数値解析の結果により、近接設置された水中・表層放水口から同時放水される密度噴流は、3 次元的に拡散することが示された。これらの結果により、実際の海域において、水中表層放水口が近接設置された場合では、3 次元数値モデルによる解析・予測が必要であると考えられる。

2 章で構築した数値モデルが、水理実験で得られた表層における密度噴流の拡散挙動を、ほぼ再現出来たことから、本モデルによる温排水拡散予測が可能であると考えられる。ただし、数値解析を実施した水理実験が、海域に流れの無い条件であったことから、本モデルの実用化には、海域の流れの影響を受けた噴流の拡散特性について検討が必要と考えられる。これらの検討については、第 4 章で行うこととする。

参考文献

- Bocard, D. N., 1984: Surface Buoyant Jets in Stagnant Water. *J. Hydraulic Eng.*, **110**, 6, 831-835.
- Bocard, D. N., 1985: Surface Buoyant Jets in Steady and Reversing Crossflows. *J. Hydraulic Eng.*, **111**, 5, 793-809.
- Johnston, A. J. and E. Volker, 1993: Round Buoyant Jet Entering Shallow Water in Motion. *J. Hydraulic Eng.*, **119**, 12, 1364-1382.
- Johnston, A. J., C. R. Phillips and E. Volker, 1994: Modeling Horizontal Round Buoyant Jets in Shallow Water. *J. Hydraulic Eng.*, **120**, 1, 41-59.
- Luketina, D. A. and J. Imberger, 1987: Characteristics of a Surface Buoyant Jet. *J. Geophys. Res.*, **92**, C5, 5435-5447.
- Nakashiki, N., S. Matsunashi, S. Sakai, T. Tsubono and K. Maruyama, 1996: Behavior of a horizontal buoyant jet discharged from a multiple pipe. *Flow Modeling and Turbulence Measurements VI*.
- N. ラジャラトナム, 野村安正訳, 1980: 噴流. 森北出版.
- 井上和也, 古寄裕三, 奥寺健彦, 豊田政史, 1996: 沿岸域における河川流出水の拡がりの解析. 水工学論文集, **40**, 473-478.
- 宮本定明, 1999: クラスタ分析入門. 森北出版株式会社.
- 高田英明, 田中等, 牛島省, 1999: 俯角方向に水中放水される温排水の移流拡散過程に関する研究. 水工学論文集, **43**, 917-922.
- 室田明, 中辻啓二, 柴垣雄一, 1984: 沿岸域での表層放流水束におよぼす浮力効果について. 水工学論文集, **28**, 113-119.
- 室田明, 中辻啓二, 柴垣雄一, 1984: 積分モデルによる三次元表層密度噴流の解析. 土木学会論文集, **435III-2**, 117-125.
- 室田明, 中辻啓二, 中辻陽一, 1990: 二次元表層密度噴流の連行特性の乱流モデルによる検証. 土木学会論文集, **423II-14**, 197-200.
- 小松利光, 古本勝弘, 椿東一郎, 細山田得三, 1987: 3次元表層成層せん断流の流れ特性. 水工学論文集, **31**, 473-478.
- 水鳥雅文, 片野尚明, 仲敷憲和, 1992: 鉛直重力噴流拡散予測モデルの開発. 研究報告:U 88051, 電力中央研究所.
- 石崎博, 1981: 乱流噴流の特性に関する研究 (第1報). 日本機械学会論文集, **48**, 1962-1700.
- 中辻啓二, 許再寧, 室田明, 1991a: 河川プルームの拡がり特性とその物理機構. 土木学会論文集,

434II-16, 29-36.

中辻啓二, 許再寧, 室田明, 1991b: 三次元表層密度流の数値実験. 土木学会論文集, 363II-4, 107-113.

仲敷憲和, 松梨史郎, 坂井伸一, 丸山康樹, 1996: 水平方向に放出された重力噴流の挙動について. 水工学論文集, 40, 537-542.

椿東一郎, 小松利光, 1978: 2次元表面密度噴流における流れの特性と連行現象. 土木学会論文集, 273, 69-81.

坪野考樹, 仲敷憲和, 松梨史郎, 坂井伸一, 丸山康樹, 1997: 複数管から放出された水平重力噴流に関する数値シミュレーション. 水工学論文集, 41, 295-302.

片野尚明, 1983: 水中放流方式による温排水の混合希釈家庭に関する研究. 博士論文, 日本大学.

片野尚明, 河村博美, 1978: 単一水平管による温排水の水温低減化に関する研究. 研究報告:U 377021, 電力中央研究所.

有田正光, G. H. JIRKA, 玉井信行, 1986: 二次元表層放出密度流の流動形態と混合に関する研究. 土木学会論文集, 375II-6, 61-67.

第4章

表層および水中により同時放水される温排水の実海域における拡散特性と数値解析

4.1 はじめに

前章までにおいて、表層放水口・水中放水口から単独放水される場合、および近接設置された表層・水中放水口から同時放水される場合の、密度噴流の拡散挙動の把握、および数値モデルの適用性の検討を水理実験および数値計算により行ってきた。しかしながら、本モデルを実海域への温排水の拡散範囲予測に適用するためには、実際の海域における拡散形態の把握、および本モデルの実海域への適用性の検討が必要となる。そこで、表層水中放水口が近接設置された発電所周辺海域を対象として、観測により温排水の拡散形態の把握を行い、数値モデルの適用性の検討を行った。

実海域の観測では、湾奥に表層放水口（流量約 $70\text{m}^3/\text{s}$ ）、湾口に水中放水口（マルチパイプ方式、流速 4.0m/s 、流量約 $160\text{m}^3/\text{s}$ 、設置水深約 15m ）が設置された発電所の前面海域において行い、表層・水中放水口から近接放水される温排水の拡散形態の把握を行った。特に、本海域では、潮流が卓越していることから、各潮時における温排水の拡散挙動について検討を行った。

放水口から十分離れた温排水は、海域の流れの影響を受けて拡散するため、数値モデルを用いた温排水の拡散範囲予測では、海域流動の影響による温排水の拡散挙動を予測する必要がある。これら実海域への数値モデルの適用は、坂井ら（1997）が水中放水された温排水について、および水鳥ら（1999）、（2000）が表層放水された温排水について実施し、実海域での観測結果と比較により、本モデルの適用性の検討がなされてきた。しかしながら、これらの研究では、対象海域の流動条件を静止場や一方向流として前章までのモデルを実海域に適用している。そのため、観測した海域のように潮流が卓越するような場合では、前章までのモデルでは適用が難しいことから、潮流が取り扱えるようにモデルの改良が必要となる。また、坂井、水鳥らの適用性の検討では、放水口近傍の観測結果の再現性について検討しているために、都築ら（1992）が実施したような、温排水の拡散範囲予測を実施していない。そのため、本章では、モデル改良を行い、本モデルを観測結果に適用するとともに、実際の温排水拡散予測と同様の計算を行い、水温上昇範囲を予測した。そして、数値解析結果と観測結果およびモニタリング結果とを比較し、本モデルの温排水拡散範囲予測の適用性の検討を行った。

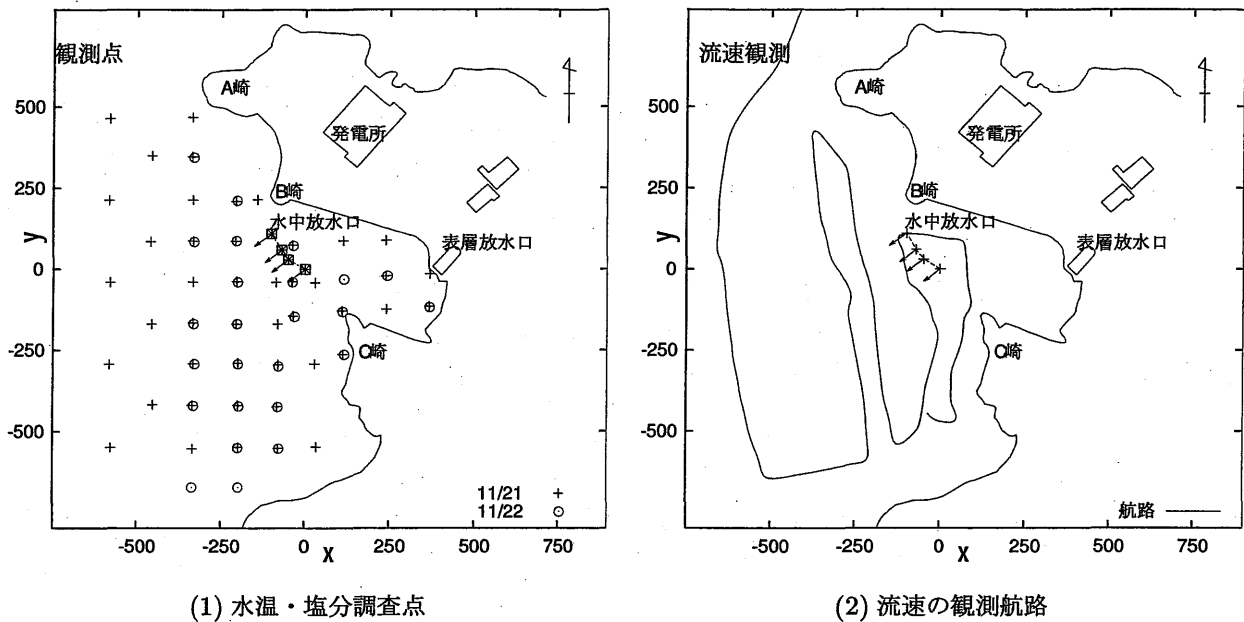


図 4.1 観測範囲の概要と調査点位置

本章の2節において実海域で実施した観測の内容・結果を、3節において3次元数値モデルの改良点を、4節において観測結果およびモニタリング結果に3次元温排水拡散モデルを適用した結果について、記述する。

4.2 実海域での観測

近接設置された表層・水中放水口から同時放水される温排水の拡散形態は、各放水形式で単独放水された温排水とは異なり、表層・水中放水口からの温排水が相互干渉し、上昇水温および水温の鉛直分布が変化していることから[坪野ら, 1999, 2000a], 温排水拡散パターンや温排水層厚の変化の再現性が、3次元温排水拡散予測モデルを検証する上で重要な要素となる。そのため、観測では、放水口近傍の表層放水と水中放水が混在する海域において実態調査し、各潮時での温排水拡散パターンと層厚変化の検討を行った。

4.2.1 調査概要

図4.1に観測海域の概略と観測点位置を示す。観測は、外海に面した小規模湾域に表層・水中放水口が近接設置している臨海発電所前面の湾周辺海域を対象として行った。放水口は、湾奥の表層放水口と湾口部付近の水中放水口が隣接している。水中放水口はB崎の南沖合の水深L.W.L-13mに位置し、4条(8ノズル)の放水管から南西方向へ温排水が放水されている。

表4.1に調査工程、表4.2に調査時の放水条件と気象・海象条件を示す。観測期間中、温排水は、表層放水口(断面2.2m×2.2mの放水口17本)から南西方向に流量38.9m³/s、流速約0.47m/s、取放水温度差6.3°Cで、マルチパイプ式の水中放水口(L.W.L-13m、4条の放水管、各放水管あたり2本のノズル、合計8本のノズル)から沖合い方向に、流量164m³/s、流速約4.2m/s、取放水温度差6.9°Cで放水されている。

表 4.1 調査項目

調査項目	11/21	11/22
温排水層厚・ 拡散パターン	1 回目 ←→	2 回目 ↔

表 4.2 調査時の放水条件と気象海象条件

観測日		1998 年 11 月 21 日			11 月 22 日
潮持		満潮	下げ潮	干潮	上潮
観測時間 (時:分)		10:00-11:20	13:00-14:00	15:50-16:50	08:10-09:10
表層 放水 口	流量 (m^3/s)	38.9			
	流速 (m^3/s)	0.47			
	放水温度 ($^{\circ}\text{C}$)	27.0	26.9	26.9	26.9
水中 放水 口	流量 (m^3/s)	164.9			
	流速 (m^3/s)	4.2			
	放水温度 ($^{\circ}\text{C}$)	27.6			
風向		S	NW	NW	S
風速 (m/s)		5.4	3.4	4.2	5.0
環境水温 ($^{\circ}\text{C}$)		20.8	20.8	20.8	20.5
塩分		34.0	34.0	34.0	34.0

温排水層厚・拡散パターンの実態調査を、図 4.1 に示す測点において、11 月 21 日 (47 測点) の満潮時、下げ潮時、干潮時と 22 日 (25 測点) の上げ潮時に対して実施した。これらの測点において、船舶から水温・塩分計 (STD) を降ろし、海表面から海底面まで 0.5m 間隔にスポット観測を実施した。

全体的な温排水の流動パターンを把握するために、別の観測船に水温・塩分計 (ADL32M) とブロードバンド型 ADCP 流速計を舷側に取り付け、温排水の影響域を速度 3~5 ノットで航走し、海面下 0.5, 1, 2, 3, 4, 5m の水温と塩分、ならびに海面下 2m から水深の 9 割に相当する海底までの流速分布を 1m 間隔で観測した。

定点での流速調査のために、水中放水口の沖合約 300m の測点 01(水深 29m) と、温排水の影響が及ばないと考えられる測点 02(水深 31m) の海底に、ワークホース型 ADCP 流速計 (600kHz) を設置し、海底上 1.5m から 1m 間隔に全水深の 9 割に当たる表層付近までの 3 次元流速分布を観測した。観測期間は、11 月 21 日の 11 時から 22 日の 11 時までであり、ADCP の測定間隔を 10 秒 (24ping 平均) に設定した。この設定時のビーム方向の流速測定精度 (公称) は、約 1.9cm/s である。なお、同測点において、水温計 (AT-32k) を 3, 7, 11m 層に設置し、また、測点 02 には海底に波高計を設置して水温および波高観測を行った。

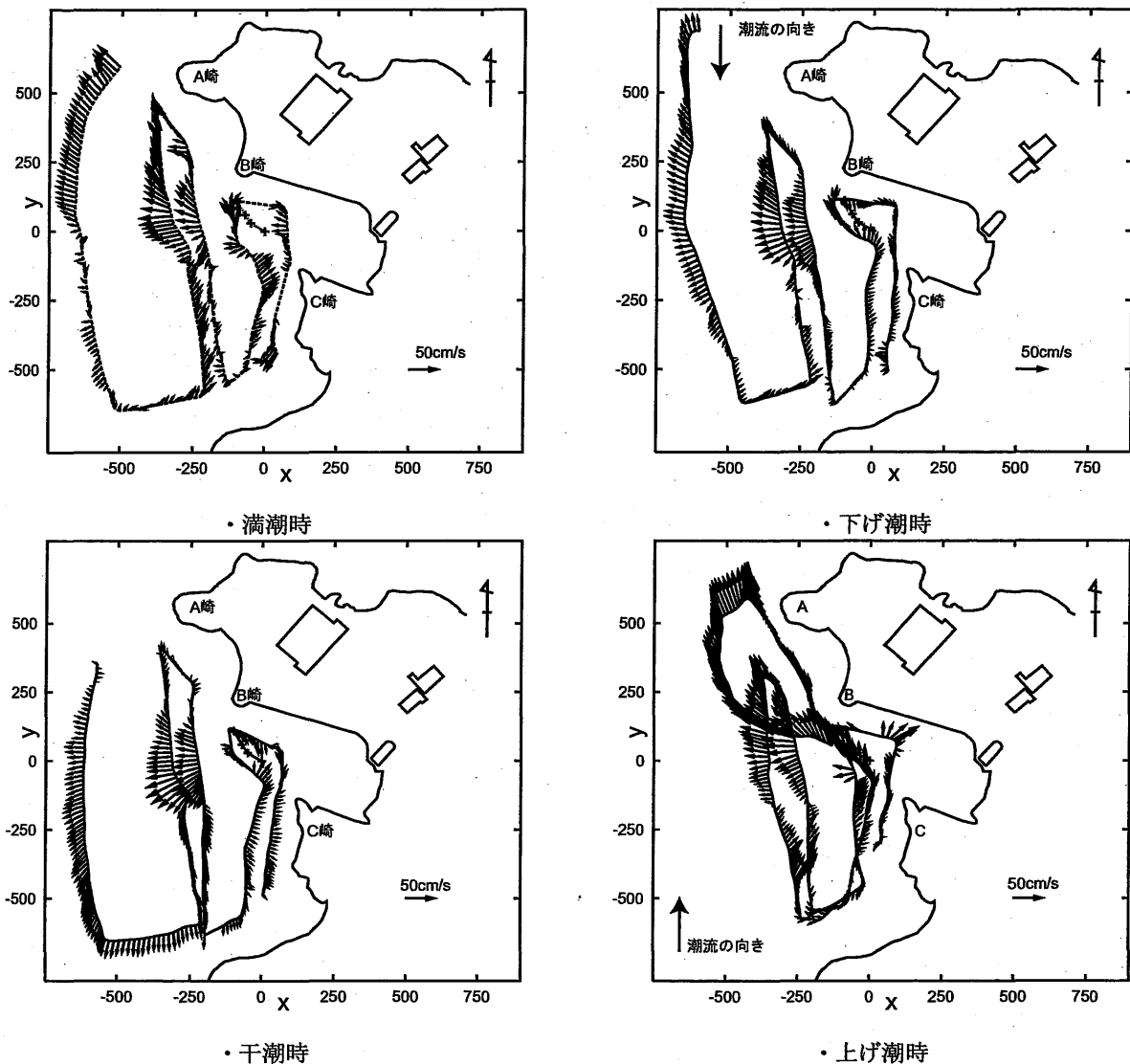


図 4.2 四潮時の表層流速平面図 (海面下 1m)

4.2.2 温排水の拡散形態

(1) 温排水の水平分布

図 4.2 に航走観測による四潮時の表層流速分布 (水深 2m) を示す。図 4.3 に放水口近傍域における四潮時の表層水温分布 (水深 1m) を示す。ただし、ADCP による表層流速分布図 4.2 は、船の動揺の影響によるノイズを除くために、対象測点の重みを 0.5、その前後の測点の重みを 0.25 として空間移動平均した値を示している。

本海域では、M2 分潮が支配的であり、続いて K1 分潮が卓越している。汀線から離れた領域の流速結果より、本海域での潮流は、上げ潮時には北東流、下げ潮時には南西流となることがわかる。

噴流起因と見られる流動は、上げ潮から満潮時では、水中放水口前面の温排水は潮流の影響を受けて北西方向に流れており、下げ潮から干潮時では、西から西南西方向に流れている。また、上げ潮から満潮に

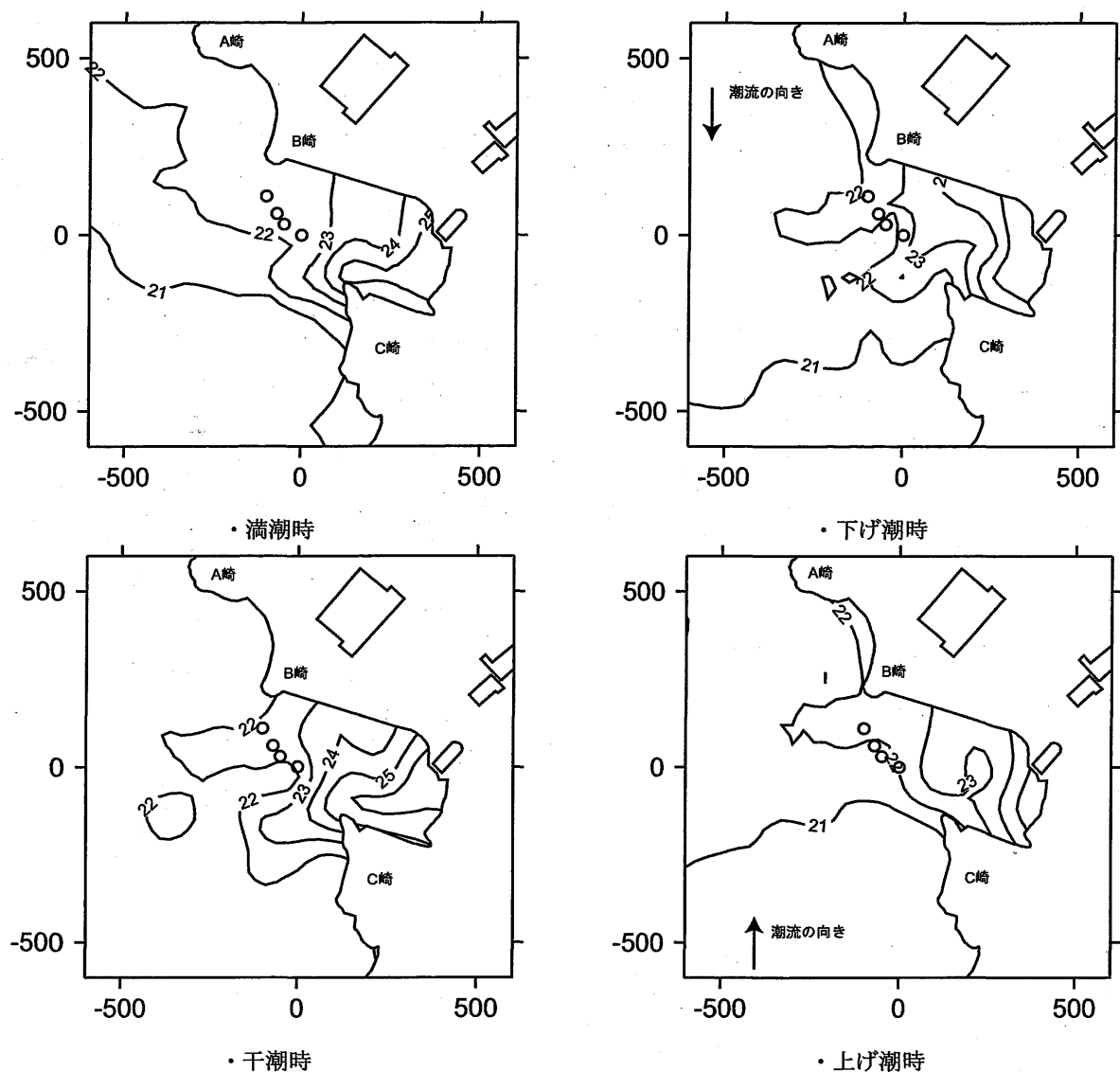


図 4.3 四潮時の表層水温水平分布 (海面下 1m)

かけては、南側海域から水中放水口の前面付近まで沖合水が流れ込む結果となっている。

図 4.3 より、湾奥から水中放水口の位置までの湾内では、湾奥から表層放水された温排水により、各潮時ともに高温（上昇水温 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ ）となるが、水中放水口の位置する湾口部から外海では、上昇水温が約 1°C 程度となる。

水温 1°C 上昇域は、上げ潮・満潮時において、水中放水の北側に位置する B 崎および B 崎より沖合いの A 崎の陸地に沿って北西方向に分布し、干潮・下げ潮時において放水口北側と南側の両側から沖合いに分布し、潮時に連動して温排水が拡散していることが分かる。ただし、干潮・下げ潮時の温排水の拡散域は、満潮・上潮時の分布と異なり、水中放水口前面を境に二股に分かれる凹型の分布形状となった。

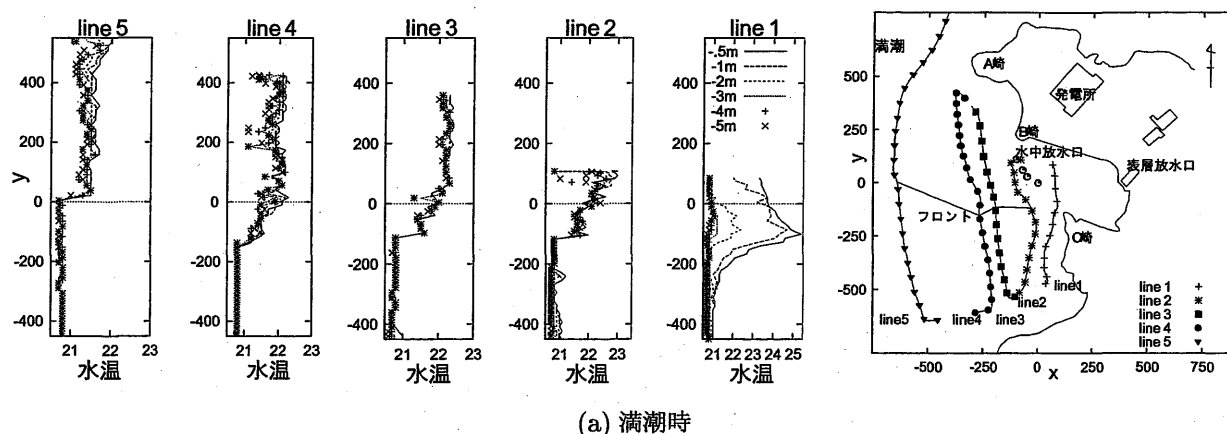


図 4.4 流速と同時観測した水温の分布

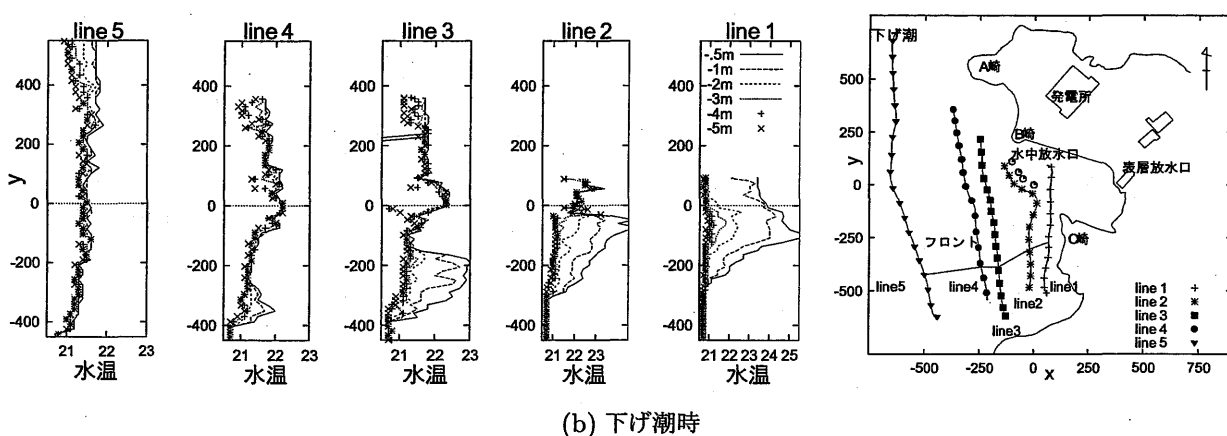


図 4.5 流速と同時観測した水温の分布 (図 4.4 の続き)

(2) 温排水層厚の変化

図 4.4 に ADCP による流速測定ライン (観測 line 1~5) 上での、各層 (-0.5, -1, -2, ... -5 m) の水温分布を示す。図中の水温分布は、右図に示す観測 line 上での各層での水温値を示している。

湾口より湾内を通る観測 line 1 上では、全潮時において、水温が -0.5m 層で最も高く、下層に連れて徐々に低減する水温分布となっており、湾奥からの表層放水された温排水がこの領域に拡散していることが分かる。

水中放水口から放水方向に 100m 以上沖合いでの観測 line 3, 4, 5 の各層での水温値を見ると、満潮・上げ潮時では、水中放水口より北側で、鉛直方向にほぼ一様な上昇水温となっている。水中放水された温排水は、水中放水に伴う流動と乱れ的作用により、海面から海底面の間で鉛直方向に混合し、周囲水を連行加入するとともに、水温は鉛直方向に一様な分布となることから、図 4.3 で北側の陸地に沿って拡散する温排水は、水中放水により鉛直方向に混合した温排水が沖合いに拡散していることが分かる。また、干潮・下げ潮時の観測 line 3 の各層での水温値を見ると、水中放水口前面より北側の領域では、上層から下層まで一様な水温値となることから、水中放水口前面より北側では水中放水の影響により鉛直方向に混合

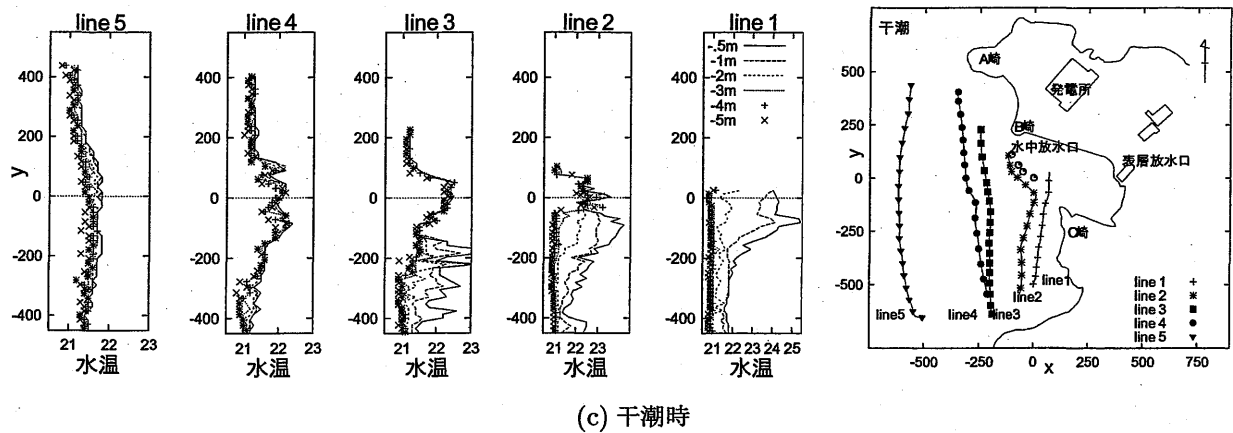


図 4.6 流速と同時観測した水温の分布 (図 4.4 の続き)

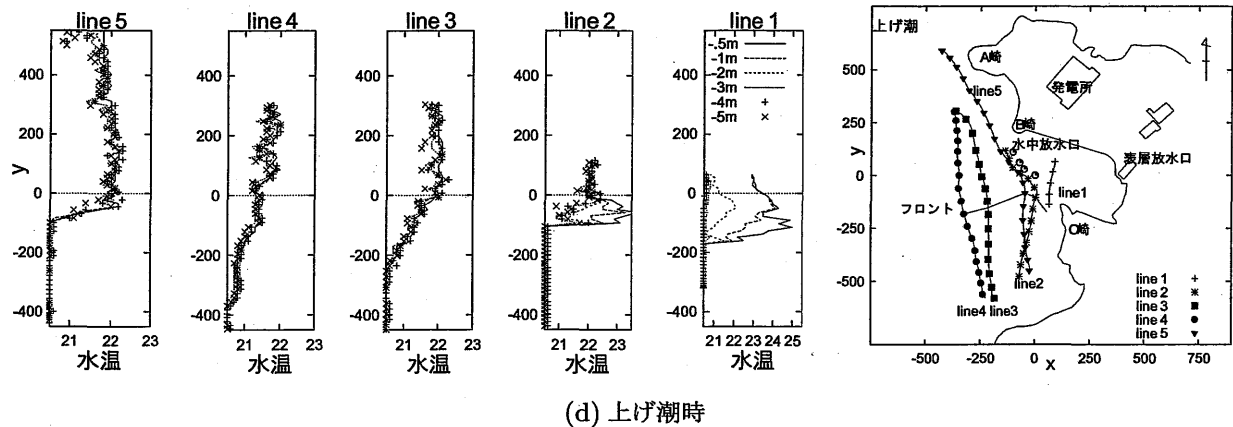


図 4.7 流速と同時観測した水温の分布 (図 4.4 の続き)

した温排水が拡散していることが分かる。

同ライン line3,4,5 上の水中放水口より南側では、満潮時、上げ潮時において、全層にわたり水温上昇が見られない測点が続き、外海からの流れにより、フロントが形成されている。下げ潮時では、この海域での沖合い南からの流れが弱くなるため、フロントは満潮時に比べて南下する。そして、干潮時には、フロントがさらに南下し、観測 line3,4 上の南側において見られなくなる。

フロントが南下すると、観測 line3 での満潮・上げ潮時に上昇水温が観測されなかった測点で、表層付近に温排水の大部分が存在するような測点が見られ、観測 line1,2 で観測された湾内の表層放水起因の温排水が、フロントの南下とともに、この領域に拡散したものと考えられる。

水温の鉛直混合の平面分布について検討するために、図 4.1 に示した水温・塩分調査点での水温分布について、3 章と同様のクラスター分析を行った。3 章と同様に、個体である観測地点だけでなく、層厚を 1m から 20m と変化させた Gauss 分布についても、指標としてクラスタ分析を行った。

クラスタ分析した結果、鉛直分布が 3 つに分けられ、その分布は、層厚が 0~5m, 5~10m, 10m~と Gauss 分布と同じ分布に分類された。図 4.8 に各潮時の温水層厚を示す。図中の記号+, □, ■, ▼は、環境水, Gauss 分布の層厚 (m) 0~5, 5~10, 10~を示す。ただし、全層の上昇水温が 0.5 °C 未満の場合

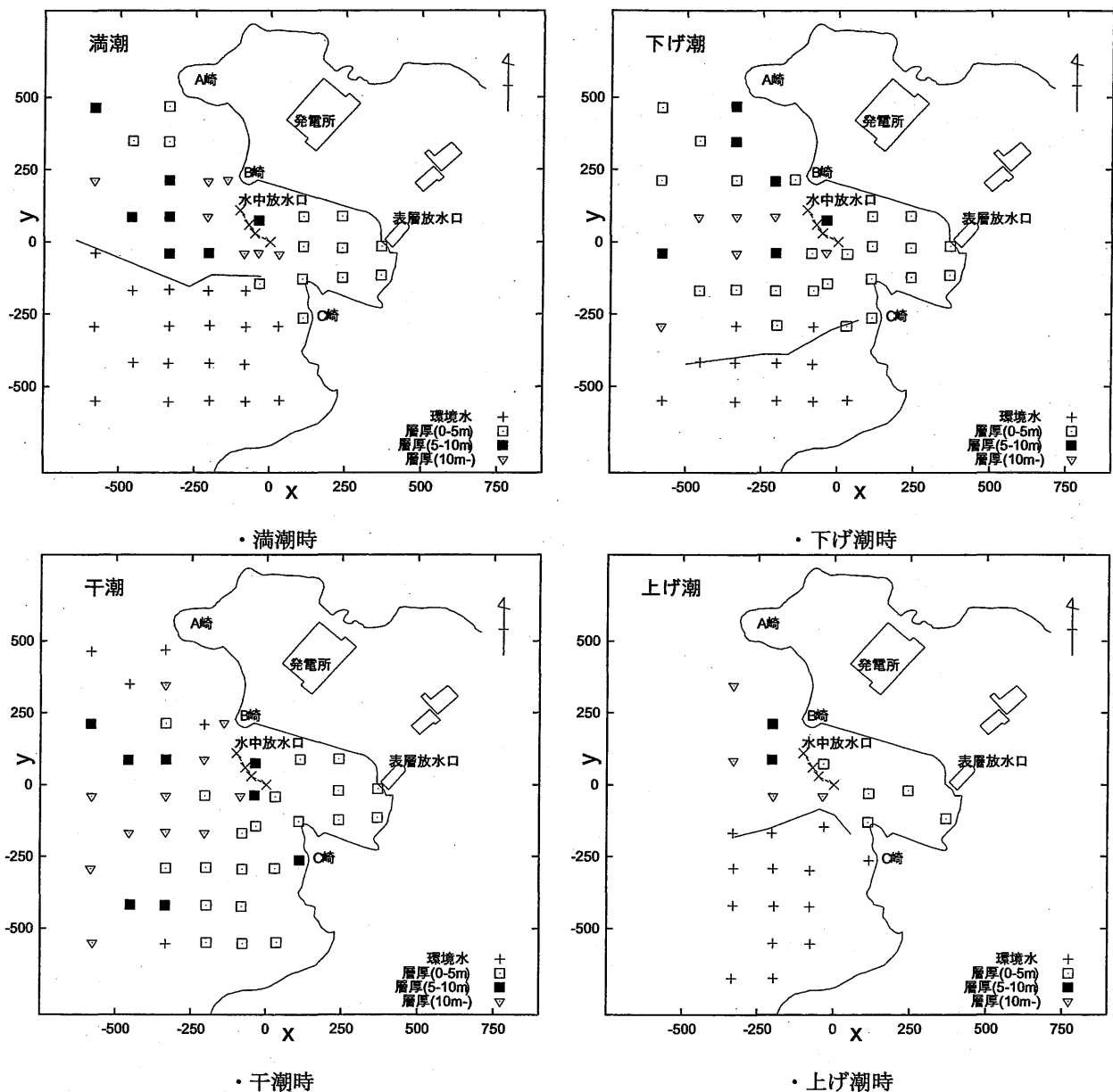


図 4.8 四潮時の層厚の平面分布

は、環境水とした。また、流速と共に計測した水温分布から、ADCP 流速観測で得られた環境水温と温排水の境界線もこの図に付記している。

本図の結果、前章の結果、および過去の知見から、層厚が0~5である Gauss 分布と同じクラスタに分類された鉛直分布は、表層放水起因の温排水の結果であると考えられる。また、層厚10~である Gauss 分布と同じクラスタに分類された鉛直分布は、水中放水された温排水が表層に浮上し、発達領域にある噴流としての流れおよび乱れにより、鉛直方向に混合が促進された温排水の結果であると考えられる。そして、層厚5~10である Gauss 分布と同じクラスタに分類された鉛直分布は、表層放水された温排水の鉛直分布が水中放水された噴流の影響を受け、鉛直方向に混合が促進された結果、および水中放水された温排水が表層に浮上し、沖合いに拡散することによって表層噴流として十分に発達した結果の2つであると

考えられる。

平面分布は、図 4.4 で示した結果と同様に、層厚が 5m 以下となる領域は、全潮時ともに湾内において観測された。ただし、放水口後側においてのみ、上げ潮時を除いて層厚が 5 m 以上となっており、水中放水口の前面だけではなく、後側でも水中放水の影響を受け、鉛直方向に混合されていることが示唆される。

湾外における層厚が 5m 以下となる領域は、環境水温と温排水の境界線が南下する下げ潮・干潮時のみに C 崎沖において観測された。また、層厚が 5m 以上となる領域は、潮流の影響により南北に移動するが、全潮時ともに水中放水口よりも北側において観測され、図 4.4 で示した結果と同様となった。

これらの結果から、湾奥で表層放水された温排水が、湾内から湾外に拡散するとき、満潮時・上げ潮時では潮流が北向きとなり、湾口の南側において潮流が温排水の拡散を阻害することから、水中放水口からの温排水と積極的に混合しながら拡散していることが分かる。

下げ潮・干潮時においては、潮流が満潮時とは逆の流れである南向きとなり、温排水が、環境水温と入れ替わるように湾内から沖合い南方向に拡散し、表層放水された温排水が水中放水された温排水と混合しないまま湾口から沖合いに拡散することが分かる。また、水中放水された温排水は、水中放水口の放水方向に拡散している。

図 4.4 での下げ潮・干潮時の観測 line 3 を見ると、水中放水口の前面において水温が低減する測点が見られる。さらに、この line3 での各層の水温が同程度であること、およびクラスタ分析の結果でも層厚が 5m 以上の分布となっていることから、水中放水された温排水が下層の環境水を巻き込みながら、海表に到達するため、浮上点付近の水温が周辺海域よりも小さくなったと考えられる。

以上の結果から、干潮・下げ潮時では、水中放水口の前面より北側では、水中放水された噴流の影響により鉛直方向に混合した温排水が拡散し、南側では湾内からの表層放水起因の温排水が拡散する。そして、水中放水口の前面において、放水口から浮上するまでに環境水を連行して低減された温排水が拡散するために、表層での上昇水温の水平分布図 4.3 のコンターの形状が凹型となったと考えられる。

4.3 3次元数値モデルの変更点と条件設定

4.3.1 モデルの変更点

前節で説明したように本海域では、M2, K1 分潮の潮汐流が卓越している。このような非定常な流れを温排水拡散モデルにおいて再現するためにモデル改良を行った。また、表層水中放水口から放水された温排水は、放水口より離れると噴流として拡散するよりも、海域の影響により拡散すると考えられる。そのため、粘性・拡散項において、噴流と海域の影響を考慮したモデルとした。以下より、モデルの変更点を示す。

4.3.2 粘性係数

温排水の拡散現象は、放水口近傍領域では温排水の運動量が卓越するため、渦動粘性・拡散係数は温排水自身の乱れに依存する。また、温排水が十分に広がった遠方域では、温排水自身の運動量は小さくなり、渦動粘性拡散係数は海域の乱流特性に依存する。本モデルは、このような拡散現象を考慮するために、温排水放水に伴う渦動粘性拡散係数と海域の乱れによる渦動粘性拡散係数の値をそれぞれ比較し、大

きい値を渦動粘性拡散係数として各時刻・各計算点に設定する方法を採用した。

(温排水の渦動粘性・拡散係数)

放水口近傍において、複数の放水口から放水された温排水による周囲水の連行現象等を精度よく予測するために、渦動粘性拡散係数は表 2.5 に示した一般的な $k-\epsilon$ モデルで算出した。また、鉛直方向の渦動粘性・拡散係数については、局所リチャードソン数により非等方的な取り扱いを行った。

(海域の渦動粘性・拡散係数)

海域流動の水平渦動粘性拡散係数、および鉛直渦動粘性拡散係数は、観測値を設定する。ただし、陸地付近の水平渦動粘性・拡散係数は、陸地境界により乱れが抑制されると仮定して、以下に示す放水口からの距離の関数として扱うことにし、海域の渦動粘性 $\nu_{ia}, i: x, y$ および拡散係数 $\alpha_{ia}, i: x, y$ は、以下に示すように観測結果 $\nu_{i0}, \alpha_{i0}, i: x, y$ を超えない限り距離の $4/3$ 乗に比例するとした。

$$\begin{aligned}\nu_{ia} &= \min(\nu_{i0}, \nu_{iL}), i: x, y \\ \alpha_{ia} &= \min(\alpha_{i0}, \alpha_{iL}), i: x, y \\ \nu_{iL}, \alpha_{iL} &= 0.01 \times L^{4/3}, i: x, y\end{aligned}\quad (4.1)$$

ここに、添え字 x, y は、各方向を示し、添え $a, 0, L$ は、それぞれ計算に用いる、観測値に基づく、および放水口からの距離に基づく値をあらわす。

(モデル内で設定される渦動粘性拡散係数)

以上のように求めた噴流と海域流動の渦動粘性および拡散係数を用いてどちらの現象が卓越するのかを判定するモデル化を行った。今回の計算では、各現象の粘性拡散係数を比較するのではなく、レイノルズ方程式の粘性項の大きさを比較することにより、大きな値を卓越する現象とみなして、その項を採用した。

4.3.3 潮汐流動の再現

潮汐流動を再現するために、水面変動の影響を考慮したモデルとした。ただし、今回用いたモデルは、計算時間短縮のために重力波と噴流の計算を分離し、波速を考慮しないで温排水拡散予測を行える方法を採用した。

具体的には、他のモデルを用いて、あらかじめ潮汐変動に伴う水面形を計算し、この時々刻々変動する水位を境界条件として温排水拡散モデルに設定した。温排水拡散モデル内では、静水圧を仮定して、この水位から水圧を計算し、水位勾配で駆動される流れを計算する。この計算法は、水位勾配で駆動する波速が、密度勾配で駆動する波速に比べて十分に速く、この現象が互いに干渉しあわないと仮定するモード・スプリットの考え方に基づいている。本来のモード・スプリットモデルは、いくつかの計算ステップで相互のやりとりを行うが、噴流の水面形に与える影響が小さいと仮定して、以下の手順で計算を行うモデル化を行った。

1. 初期・境界条件の設定

- (a) 時刻 0 での流速場の初期値を、別のモデルで計算された流速場から補完することによって求める。
- (b) 温排水拡散モデルの各点での水位を、大領域で計算された潮汐 1 周期分の水位から補間して求める。

2. 計算開始「2.(a) から (c) までを指定した回数反復する」

- (a) 水位から静水圧を水平方向の運動方程式に負荷する．つまり，静水圧と動圧を加えた圧力で水平方向運動方程式を解く．
- (b) 表層での鉛直流速は，1.(b) で求められた水位から時間微分を行い，計算を行う．
- (c) 圧力ポアソン方程式を解く．この場合の水面の境界条件は，水平方向の流速は，1 階微分 0 とするフリースリップ条件とする．

2.(a) を式で表現すると， $\delta_{i,j}$ をクロネッカーのデルタとして，

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_j U_i}{\partial x_j} = & -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \\ & -g \frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} \delta_{i3} \quad (\text{鉛直：浮力}) \\ & -g \frac{\partial \xi}{\partial x_i} (1 - \delta_{i3}) \\ & \quad (\text{水平：静水圧}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

となる．

2.(b) では，鉛直流速を求める前に，水位の計算を行う．1.(b) の水位データはメモリー容量の制限により，計算を行う全ての時刻，全水位点の情報を与えることができない．そのため，実際の計算では，24 時間の周期 (T) の水位データは，1 時間毎 ($\Delta T : T/N$) に 24 (N) 個与えられているので，このデータから内挿補間により水位情報を設定した．水位 ξ が各時刻で与えられていると，時刻 t の水位 $\xi(t)$ は，次のようになる．

$$\begin{aligned} \xi(t) = & (1 - \tau/\Delta T) \xi^n + \tau/\Delta T \xi^{n+1} \\ n : & 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (4.3)$$

ここに， $t (= MT + n\Delta T + \tau)$ ：計算時間， M ：潮汐のサイクル数， n ：あるステップ数 ($0 \leq n \leq N$)， τ ：与えられた水位データ間の時間 ($0 \leq \tau \leq \Delta T$) である．

この水位を用いて，表層での鉛直流速 w を計算すると，

$$w = \frac{\partial \xi}{\partial t} + U_j \frac{\partial \xi}{\partial x_j} \approx \frac{d\xi}{dt} \quad (4.4)$$

となる．ただし，本モデルでは，潮汐による水位 ξ の空間微分が小さいとして，最右項の式を用いて計算を行った．

4.3.4 数値計算の諸条件

(1) 計算範囲・メッシュ等

図 4.9 に計算範囲を示す．モデルの座標系は，放水方向（西から反時計周りに 16.6° 傾いた軸）を x 軸とし，汀線方向を y 軸とした右手系の座標系を採用した．計算範囲は，最南の水中放水口を原点として x 方向に約 2km， y 方向に約 3km，および z 方向に水深約 30m（水中放水口水深約 14m）とした．ただし，計算範囲内の 30m 以深の水深は，温排水の拡散現象に影響が少ないとして，モデル上では 30m としている．

計算格子は，表 4.3 に示すように， x ， y ， z 方向ともに，可変メッシュを用いている．メッシュ数は， (x, y, z) 方向に (142, 202, 15) とし， x, y 方向の最大メッシュ間隔を 200m とした． z 方向は，表層のメッ

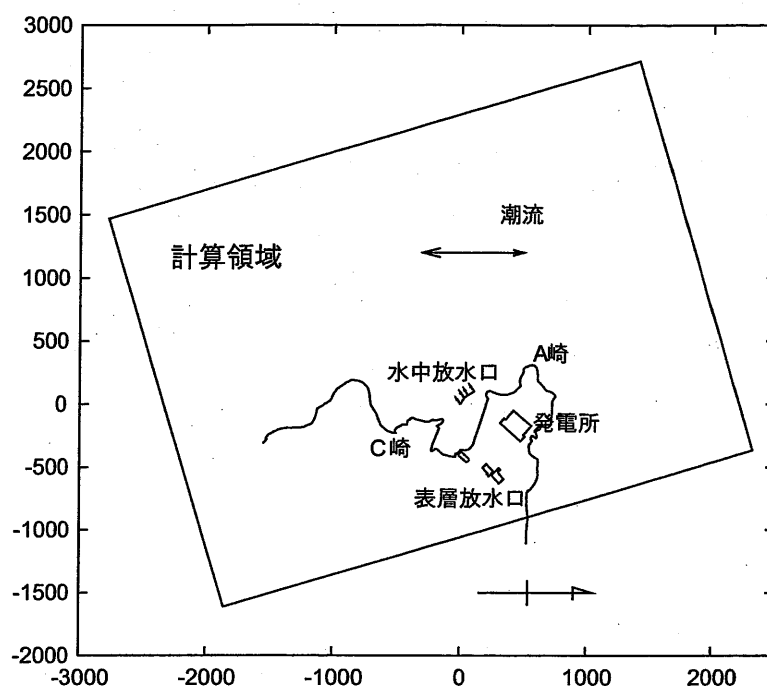


図 4.9 計算範囲

表 4.3 メッシュ数

項目	メッシュ数	メッシュ幅
x 方向	73	2.5~200m
y 方向	104	2.1~200m
z 方向	25	0.5~4.3m

シュを 0.5m とし、水深方向に 4.3m まで変化させる不等間隔メッシュとした。時間間隔は 0.15 秒とした。また、海底地形は、海図、放水口近傍の海底地形の図より、FAVOR 法によりモデル上で再現する。

(2) 境界条件・放水口条件・渦動粘性拡散係数

表 4.4 に、本モデルの境界条件および放水口条件を示す。前節で述べた、観測期間中の放水条件・海域条件を参考に、放水条件・海域条件を設定した。

Riddle and Lewis (2000) は、染料を海域に放出して海域の水平方向の渦動拡散係数について検討しており、その値を $10^4 \sim 10^6$ と推定している。この結果、これまでに実施した数値計算 [福島ら, 1981; 中辻ら, 1991b], および他地点での坂井ら (1997) や水鳥ら (1999) の観測結果を参考にし、本章での渦動粘性・拡散係数を $1.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ と設定した。

2 節において実施した本海域での複数の電磁流速計を用いた観測結果から、表層放水口前面で算出した鉛直渦動粘性係数のうち、放水影響が小さいと考えられる下層において、約 $1 \sim 10 \text{ cm}^2/\text{s}$ であったことから、鉛直方向の渦動粘性拡散係数を $5 \text{ cm}^2/\text{s}$ と設定した。

表 4.4 境界条件

項目	壁面	流出入 (開境界)	海面
流速	Free Slip 底面のみマニングの粗度係数 を用いて、摩擦項を与えた。(1)	法線方向: $\partial U, V / \partial n = 0$ 接線方向:Free Slip	$w = d\eta/dt$ $\partial U, V / \partial n = 0$
水温	$\partial T / \partial n = 0$	流出条件: $\partial T / \partial n = 0$ 流入条件:環境水温	放熱条件 (2)
圧力, 乱流, エネルギー, 散 逸率	$\partial P, k, \epsilon / \partial n = 0$	$\partial P, k, \epsilon / \partial n = 0$	$\partial P, k, \epsilon / \partial n = 0$

(1) 摩擦項 $\tau = \frac{\rho_0 g n^2 U_b}{h^{1/3}} (U_b^2 + V_b^2)^{1/2} : n = 0.0025$

(2) 放熱係数: $1.826 \times 10^{-3} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$

(3) 放水口での乱流量 $k = 0.002 U^2$, $\epsilon = 0.09 k^{3/2} h^{-1}$

(U, V :流速, h :表層放水口は水深, 水中放水口は管形)

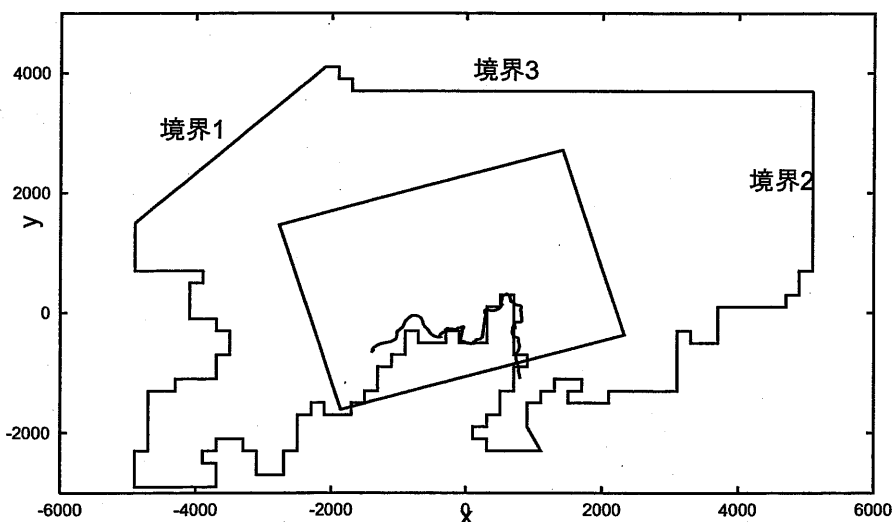


図 4.10 潮汐流動場を再現する準 3 次元モデルの計算範囲

(3) 潮汐流動の計算条件

温排水拡散予測モデルに設定する水面変動は、以下のようにして計算を行った。

潮汐流動場を再現計算するためには、放水口周辺地形だけでなく、放水口から離れた地形線および海岸線を再現する必要がある。そこで、計算範囲は、温排水拡散予測モデルの計算範囲を含む、図 4.10 に示すような南北約 10km、東西約 6.5km の範囲とした。また、地形を精度良く再現するために、FAVOR 法を採用し、静水圧近似を用いた準 3 次元モデルで計算を行った。

潮汐計算の諸条件は、以下のとおりである。潮流の再現計算を行うために、図 4.10 に示す 2 つの南側

境界1・北側境界2において、潮位条件 (M2,K1 分潮) の水位振動を設定した。

$$\begin{aligned} \text{水位 (cm): 南側境界 1} &= 0.65 \times \cos(2\pi/T1 - \pi) + 0.2 \times \cos(2\pi/T2 - \pi) \\ \text{水位 (cm): 北側境界 2} &= 0.65 \times \cos(2\pi/T1 - \pi - \pi/90) + 0.2 \times \cos(2\pi/T2 - \pi - \pi/90) \end{aligned} \quad (4.5)$$

ここに、 $T1$, $T2$ は、M2,K1 分潮の周期でそれぞれ 12, 24 時間である。南側境界 1, 北側境界 2 における法線方向の流速はノイマン条件とし、接線方向の流速は 0 とした。また、境界 1, 2 以外の沖合い境界 3 および地形における水位はノイマン条件とし、法線方向の流速は 0, 接線方向の流速はノンスリップ条件とした。

以上のような潮汐モデル・条件で 5 サイクル (1 サイクル: 24 時間) まで計算を行い、定常に達した 5 サイクル目の水位結果を温排水拡散予測モデルに使用した。

4.4 計算結果

前節で示した数値モデル (以下、温排水拡散モデルと記述する) および条件を用いて、温排水の拡散計算を行った。表 4.5 に計算ケースを示す。表 4.5 中の計算ケース 1 では、2 節で示した観測期間中の 3 基の発電機が運転中の放水条件と同じ条件で計算を行った。計算ケース 2 では、発電所中の 4 基の発電機がフル運転した場合の放水条件で計算を行った。

計算ケース 1 の結果と観測結果とを比較することにより、各潮時での温排水の拡散形態、および浮上点付近の計算結果について本モデルの適用性の検討を行った。また、計算ケース 2 の条件が環境影響評価における温排水拡散予測を行う条件であることから、計算ケース 2 の結果を平成 6 から 10 年度までの全モニタリング結果と比較することにより、温排水の拡散範囲について、本モデルの適用性の検討を行った。

計算は、海域流動を駆動するために、放水を行わない条件で 3 時間の計算を行った後、放水を開始し、日周潮の潮汐 3 サイクル 75 時間まで行った。各潮時ともに 2・3 サイクルの目の拡散範囲は同程度となり、定常状態に達していることから、本章では 3 サイクル目の結果について検討を行った。

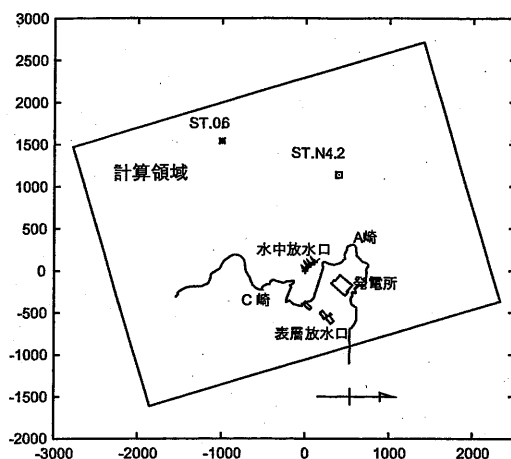
表 4.5 計算ケース

ケース	放水方式	放水水温 T_o °C	環境水温 T_e °C	上昇水温 ΔT °C	塩分	放水流量 m^3/s	放水流速 m/s	放水口幅 m
1	水中放水	27.6	20.8	6.8	34	164	4.25	2.5
	表層放水	26.9	20.8	6.1	34	37.8	0.305	71.6
2	水中放水	19.5	12.5	7	34	160	4.141	2.5
	表層放水	19.5	12.5	7	34	80	0.585	71.6

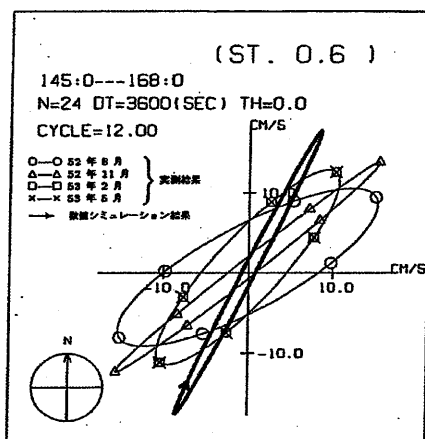
4.4.1 観測期間中の計算条件を用いた計算結果 (計算ケース 1)

(1) 潮流槽円

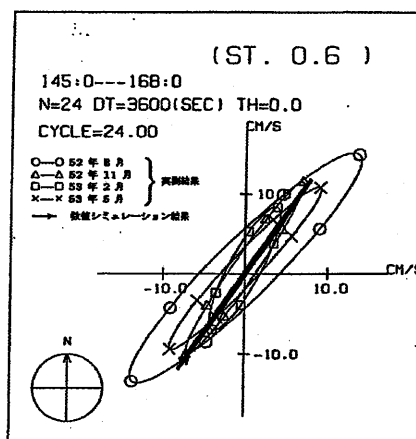
図 4.11 に温排水拡散モデルにより得られた M2, K1 成分の潮流槽円と実測値を示す。同図 (1) に測定位置、同図 (2) に準 3 次元モデルから得られた潮流槽円と実測値、同図 (3) に温排水拡散モデルで得られた潮流槽円と実測値を示す。



(1) 観測点の配置

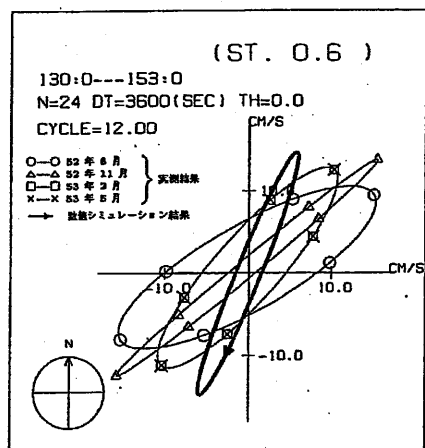


a) M2 分潮

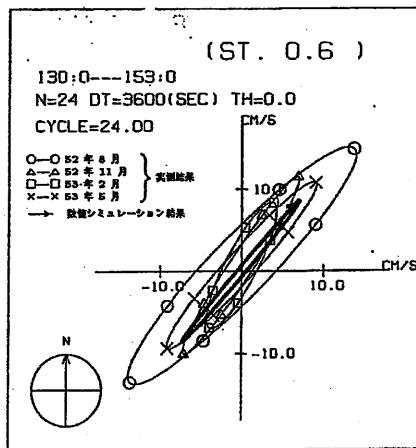


b) K1 分潮

(2) 潮流楕円の比較 (準3次元モデル)



a) M2 分潮



b) K1 分潮

(3) 潮流楕円の比較 (温排水拡散モデル)

図 4.11 潮流楕円の比較

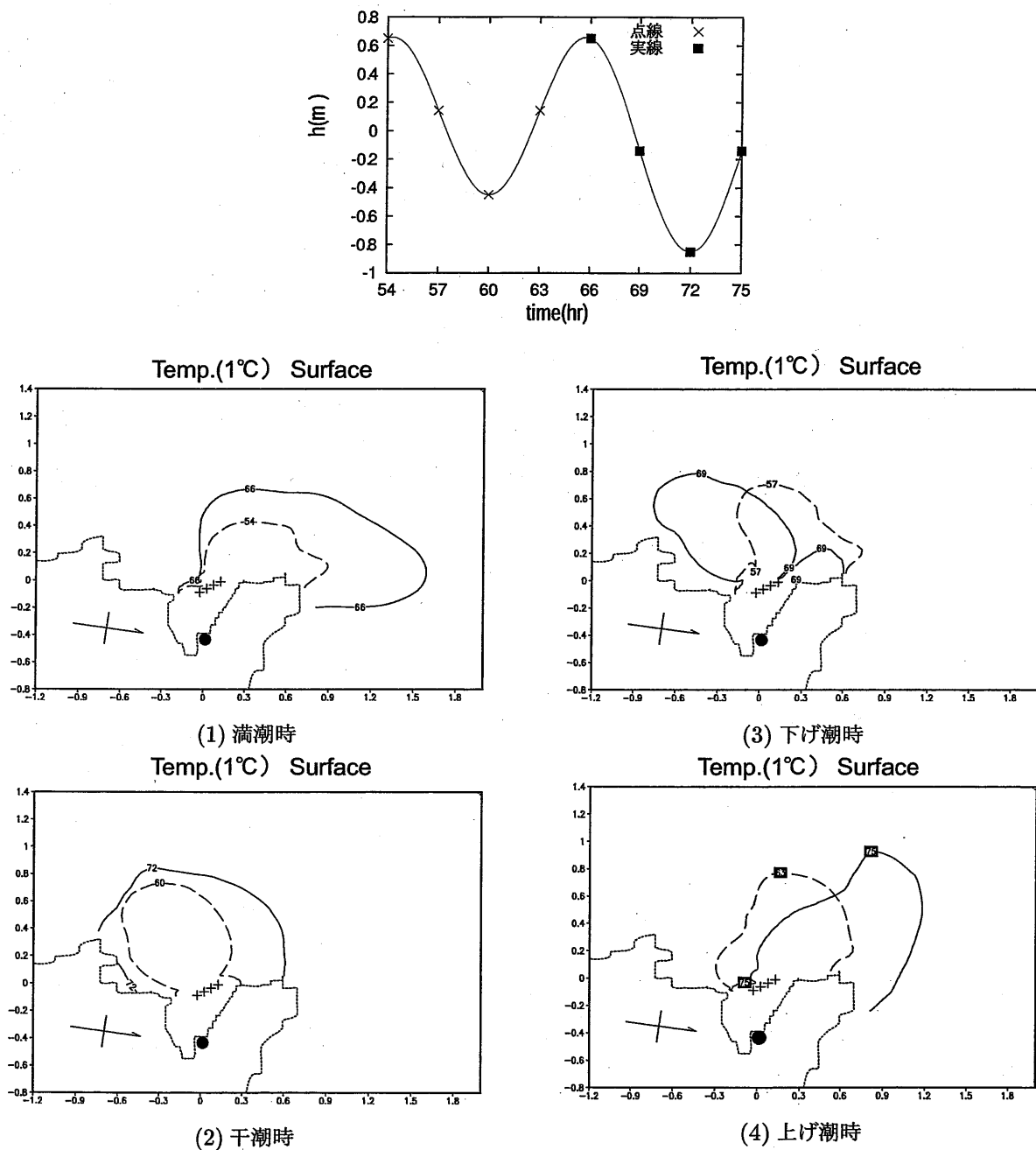


図 4.12 各潮時における表層での水温1度上昇範囲 (ケース 1)

準3次元モデルの結果は、潮位の実測結果を基に境界条件の設定を行った計算結果である。また、温排水拡散モデルの結果は、各時刻で準3次元モデルで得られた水面形を設定し、この水面変動に相当する流れを再現した計算結果である。温排水拡散モデルで得られた潮流楕円は、準3次元モデルで得られた結果および観測結果と、振幅の大きさ・傾きがほぼ同様な結果となり、潮流による水面変動を設定することにより、海面の条件を固定端とした温排水拡散モデルを用いても、準3次元モデルと同程度で潮汐流動場を再現出来ることが分かった。

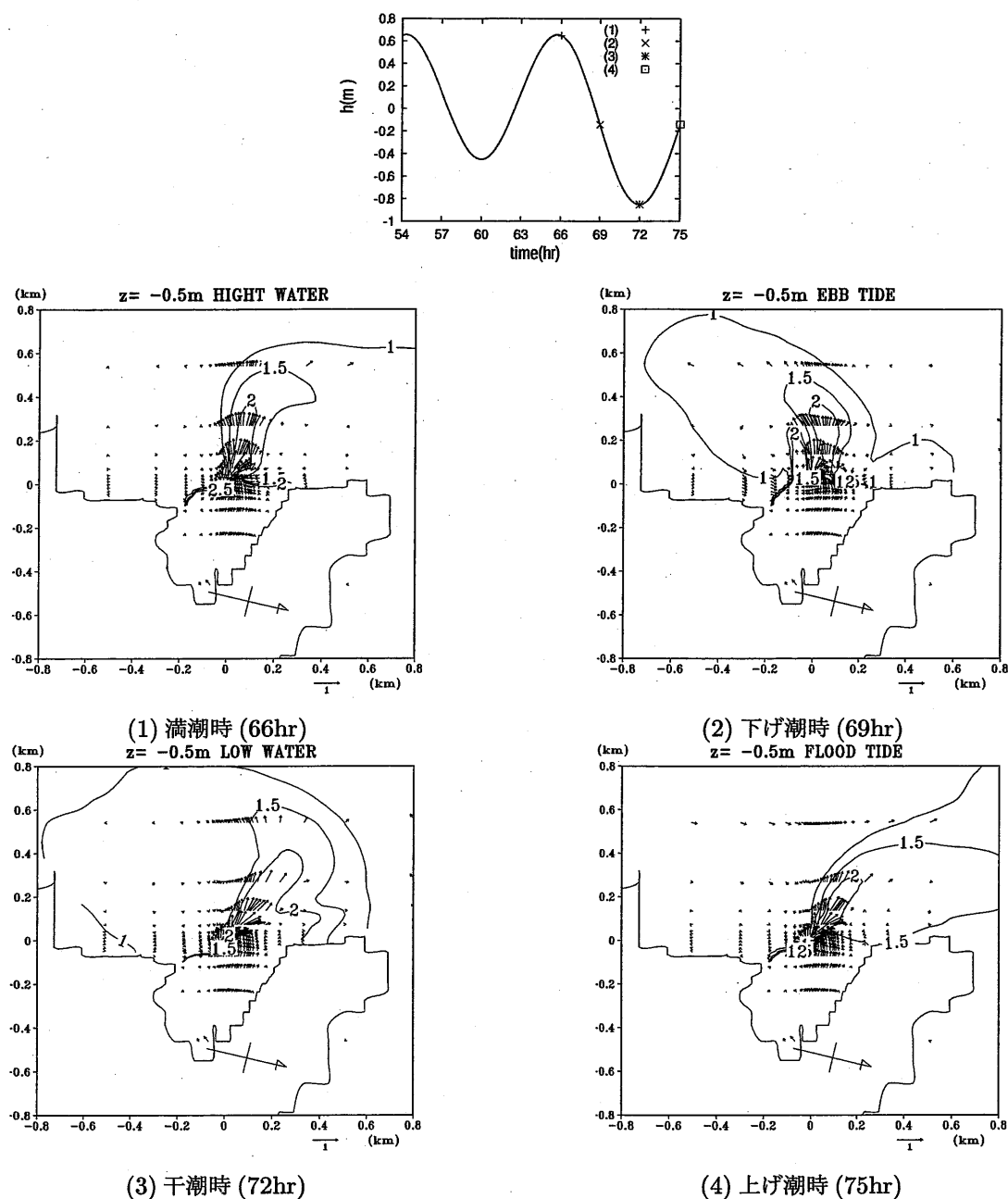


図 4.13 各潮時での水温・流速の水平分布 (計算結果)

(2) 表層での温排水拡散

図 4.12 に各潮時 (干潮・上げ潮・満潮・下げ潮時) の表層での水温 1°C 上昇範囲を示す。図中のコンター (点線, 線) は, 1 周期 24 時間 (M2+K1) のうち, それぞれ前半の M2 分潮の 12 時間 (54~63 時間), 後半の M2 分潮の 12 時間 (66~75 時間) における結果を示している。前半 12 時間と後半 12 時間の各潮時の拡散パターンは, 同様な形状を示すが, 後半 12 時間での水位勾配が急であることを反映し, 後半 12 時間の拡散範囲は, 前半に比べて潮流の方向に大きくなる結果となった。以降では, 温排水の水平方向の拡散形態に潮流の影響が顕著にみられる, 後半 12 時間の結果について検討を行う。

図 4.13 に放水口周辺の表層での上昇水温の分布、および流速ベクトルの結果を示す。図中のコンターは上昇水温を表し、0.5 度ごとに表示している。

流速ベクトルを見ると、水中放水口の南側位置で、沖合いから湾内に向かう流れが生じている。この結果、水中放水口の南側と C 崎を挟むライン上で、コンター間隔が密になり、水温が急激に低下し、 1°C より高い値を示すコンター ($1.5, 2^{\circ}\text{C}$) は、下げ潮時を除き、水中放水口の位置より北側に拡散する傾向を示した。

下げ潮時では、水中放水口の放水方向に拡散する温排水と、その南側から拡散する温排水が見られ、上昇水温の水平分布は、2 つの峰を持つコンターとなった。また、水温 1°C 上昇域は、満潮・上げ潮時では水中放水の北側に位置する A 崎の陸地に沿って拡散し、干潮・下げ潮時では、A 崎に沿って拡散するのではなく、放水口北側と南側の両側から沖合いに拡散する結果となった。上述した結果は、観測された流速ベクトルおよび水温の水平分布図 (図 4.2, 図 4.3) から示唆されており、各潮時の温排水の拡散挙動について、観測結果と比較して計算結果は良好な結果となった。

(3) 水中放水口近傍の水温鉛直分布

図 4.14, 図 4.15 に、満潮時・干潮時での測点 St.1 から St.8 における、水温の鉛直分布 (計算結果・観測結果) を示す。水温は、測点上の水温のうち、最大値と最小値で正規化した値を示している。

2 節で示したように、湾内での測点 St.1,2,5 で観測された鉛直分布は、表層放水された温排水と同様に、表層付近の水温がもっとも高く、水深-3~-4m で急激に低減するような分布を示しており、湾奥で表層放水された温排水が湾内に拡散していることが分かる。一方、水中放水口近傍の測点 St.6, 水中放水口前面海域の測点 St.3,4,7,8 での鉛直分布は、温排水が水深-10~-20m まで到達する分布となっており、水中放水された温排水の流動と乱れの作用によって鉛直方向に混合する結果となっている。

計算で得られた表層および水中放水口近傍での水温の鉛直分布は、観測結果とよく一致しており、本モデルにより、水中放水の影響による鉛直混合および鉛直分布の変化を適切に再現出来ることが確認された。

(4) 数値解析結果から得られた水中放水口近傍の拡散現象

■水中放水された温排水の浮上点位置 図 4.16 に各潮時 (1 時間毎) の水中放水された温排水の浮上点位置を示す。湾奥から表層放水された温排水の影響により、表層での水温結果では水中放水からの浮上点の位置が特定出来なかったため、表層での沖合い方向の流速が最大となる位置を浮上点と定義し、図上に示した。

各時刻での浮上点の位置は、南北方向にはあまり移動せず、潮流の影響により水中放水口の沖合い約 50m の位置から水中放水口の沖合い約 150m と東西方向に移動し、上げ潮時および満潮時では水中放水口に接近し、下げ潮時および干潮時では沖合い方向に移動する結果となった。また、浮上点付近の流速結果は、沖合い方向の流速は、約 $50\sim 70\text{cm/s}$ となった。

平成 6 年度に実施された現地調査結果報告によると、浮上点の位置が水中放水口から約 $100\sim 150\text{m}$ の位置にあり、浮上点付近の沖合い方向の流速は約 50cm/s と報告されていることから、計算結果は、浮上点位置・浮上点近傍の流速について観測結果とほぼ一致していた。

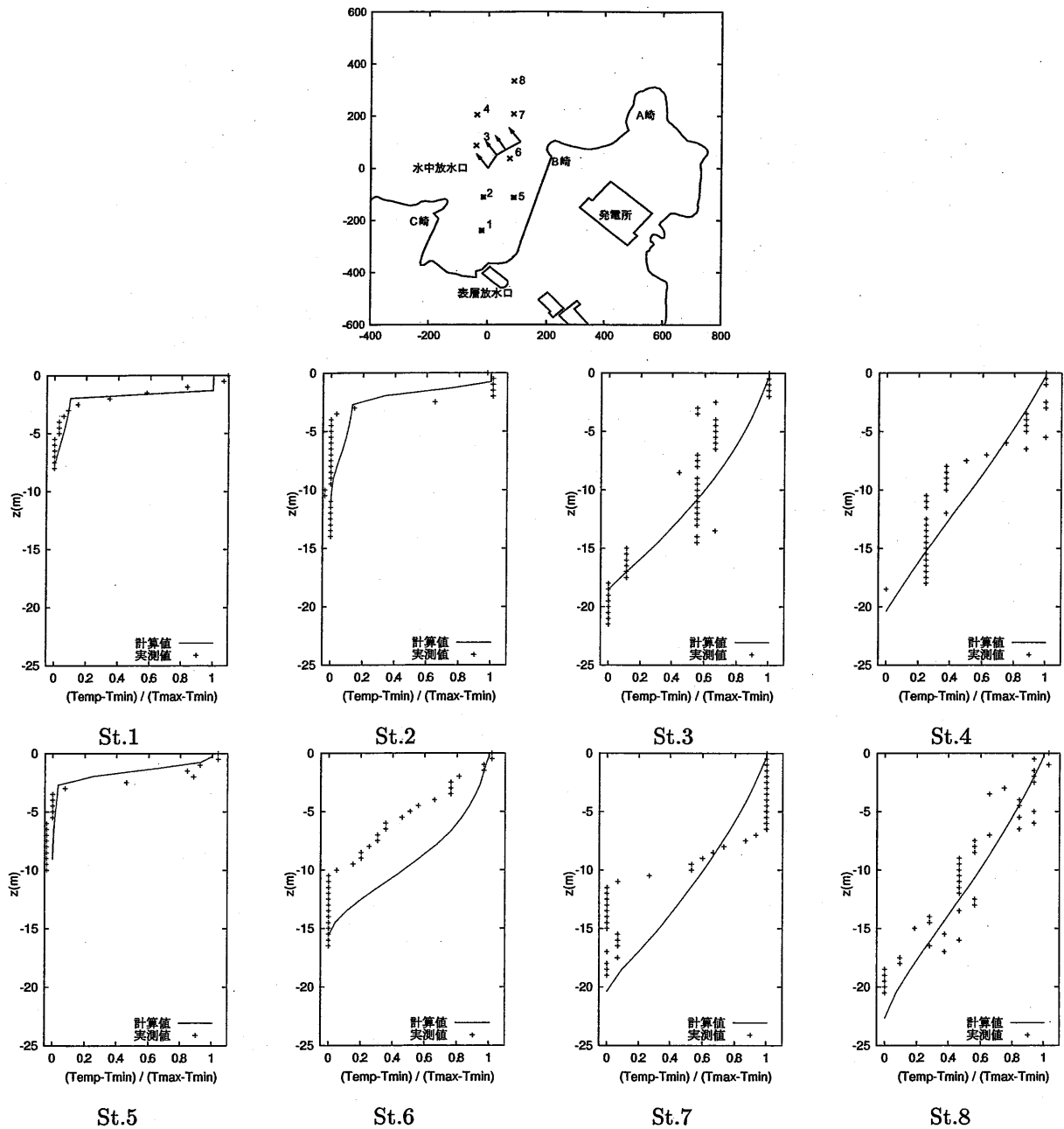


図 4.14 水温の鉛直分布 (満潮時)

■浮上点付近の拡散現象 図 4.17 に図 4.16 中の浮上点が集中する A1 - A2 ラインの縦断分布を示す。図中のコンターは上昇水温を示し、流速ベクトルは、水平流速に対して鉛直流速を 2 倍にして表示している。

図 4.17 の水温コンターおよび流速ベクトルから、上げ潮時では、温排水が水中放水された直後に浮上し、下げ潮時では、底面を這うように拡散しており、図 4.16 の結果を説明する結果となっている。また、満潮・干潮時では、上げ潮時と下げ潮時とを遷移する結果となっており、潮時により放水直後の噴流の経路、および拡散の様子が異なる。

これは、潮流の方向が汀線方向と少しずれており、上潮時では潮流が放水方向と逆方向に流れるため

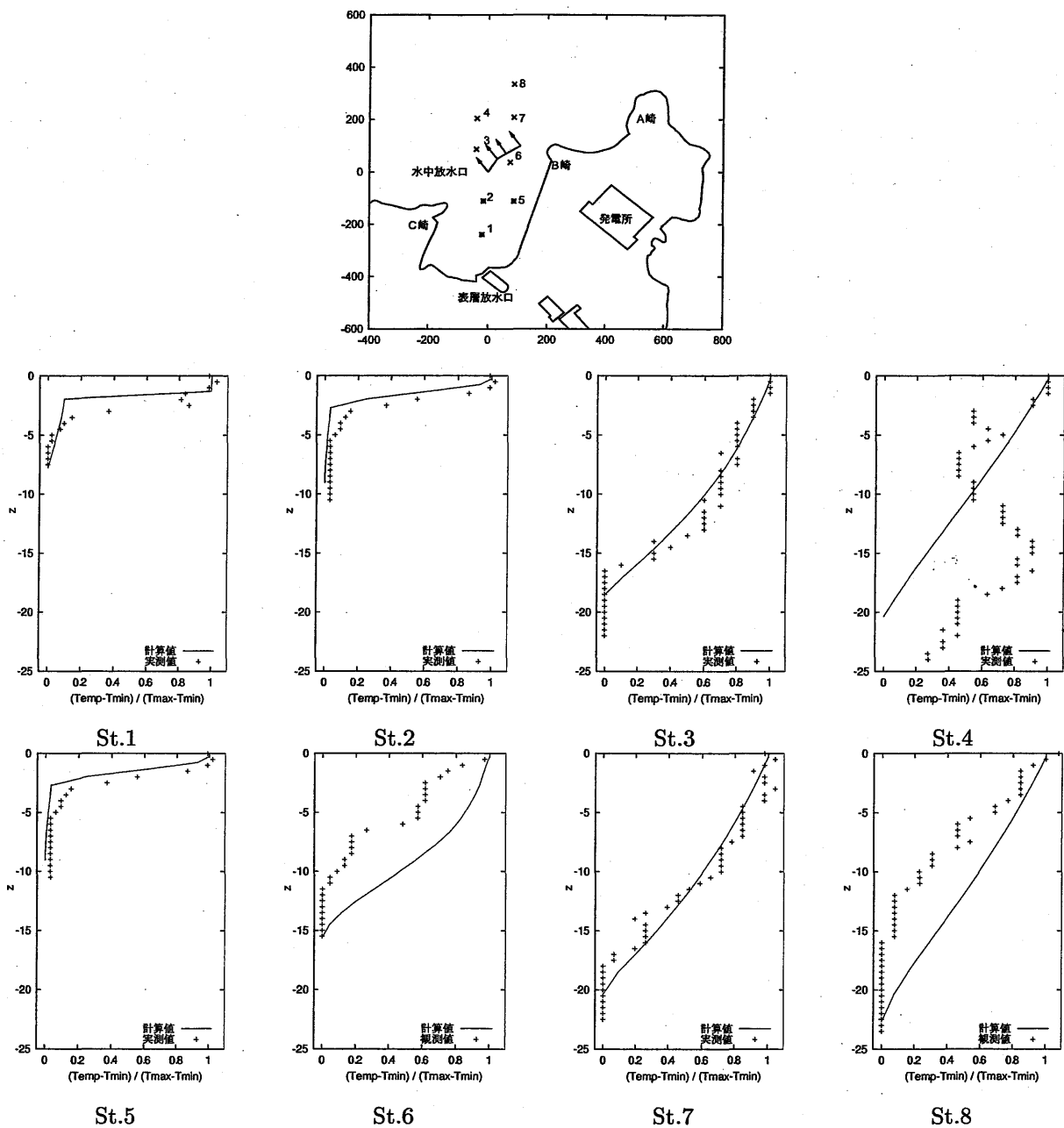


図 4.15 水温の鉛直分布 (干潮時)

に、温排水が放水直後に浮上したものと考えられる。また、下げ潮時では順方向に潮流が流れるために、温排水が底面を這うように拡散したものと考えられる。このように温排水が、放水直後に浮上する・底面に這うように拡散する現象（以下それぞれ浮上するケースをパターン1、底面を這うケースをパターン2と記す。）は、2章の実験結果でも測定され、坪野ら(1997b), (1997a), 仲敷ら(1996), 片野(1978), 高田ら(1999)等の研究においても、放水口の高さ、流速等の放水条件により、各パターンに区別されることが示されている。しかし、本章のように、放水条件だけではなく潮汐流の影響によって、これらのパターンが交互に現れる現象は、観測・実験・数値実験でも報告されておらず、本数値計算により初めて示唆された結果である。

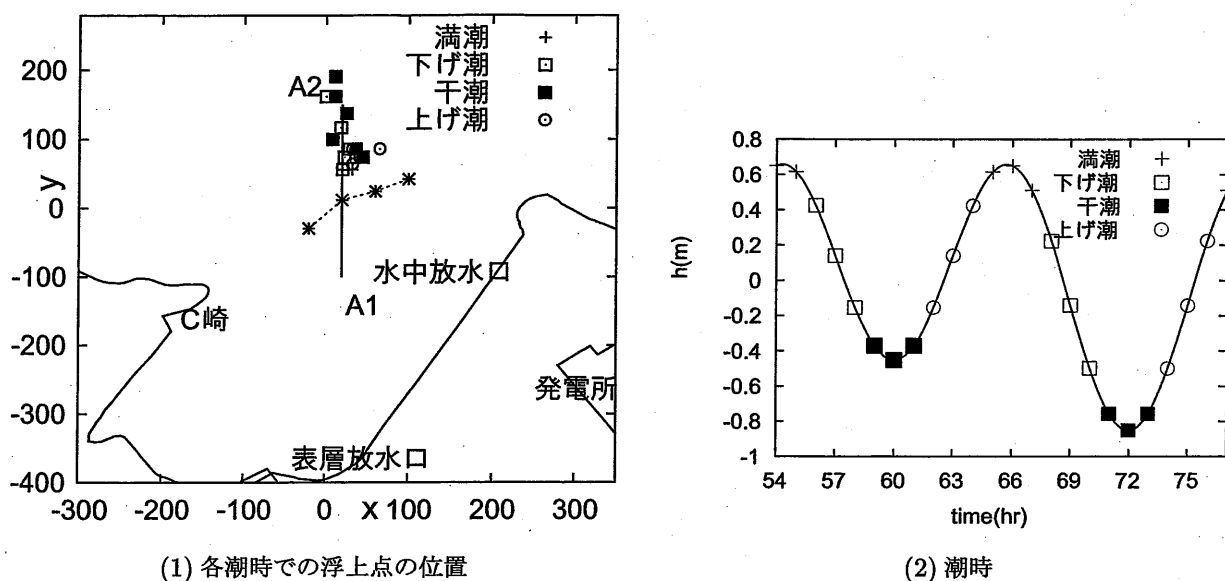


図 4.16 浮上点の位置

水中放水口の後方から前方にかけての水温の鉛直方向の間隔が、表層において密から疎となっており、水中放水口からの温排水が上層の水を連行しており、鉛直方向に混合する結果が得られた。この鉛直混合する位置は潮時によって異なり、干潮・上げ潮時では、水中放水口の真上もしくは後方に存在し、満潮・下げ潮時では、水中放水口の前面に存在し、水中放水口から放水後の浮上する経路に依存する結果となった。図 4.15 の St.6 の観測結果では、下げ潮時において、混合していない結果が得られており、実際の海域においても潮時によって浮上経路が異なることが示唆される。

図 4.17 より、水中放水口の後方から前方にかけて、表層近傍での上昇水温が低減している。前述した水中放水口後方における鉛直方向の混合以外に、干潮・上げ潮時での温排水が浮上するパターン 1 では、水中放水された噴流の連行に対する補償流れとして、底面付近で沖合いから水中放水口に向かう流れが見られることから、沖合いからの底面付近の低温の環境水を連行し、表層において水温を低減させていることが分かる。

4.4.2 温排水拡散範囲予測 (計算ケース 2)

図 4.18 に当該発電所が平成 6 年から 10 年までの冬季にモニタリングされた表層での水温 1°C 上昇範囲および平成 9 から 10 年までに発電所がフル運転の状態であった時期にモニタリングされた表層での水温 1°C 上昇範囲を示す。

モニタリング期間中の発電所の運転条件・温排水の放水条件は各年で異なり、図 4.18 の結果は、表層放水 (放水流量: 約 $60\text{m}^3/\text{s}$) のみの放水、表層放水 (放水流量: 約 $70\text{m}^3/\text{s}$) と水中放水 (放水流量: 約 $80\text{m}^3/\text{s}$) の同時放水、表層放水 (放水流量: 約 $70\text{m}^3/\text{s}$) と水中放水 (放水流量: 約 $160\text{m}^3/\text{s}$) の同時放水の条件下で、観測された表層での水温 1°C 上昇範囲を示している。

図 4.19 に計算ケース 2 の表層での水温 1°C 上昇範囲を示す。計算ケース 2 では、環境影響評価と同様に、発電機 4 基がフル運転の放水条件 (表層放水 (放水流量: 約 $70\text{m}^3/\text{s}$) と水中放水 (放水流量: 約

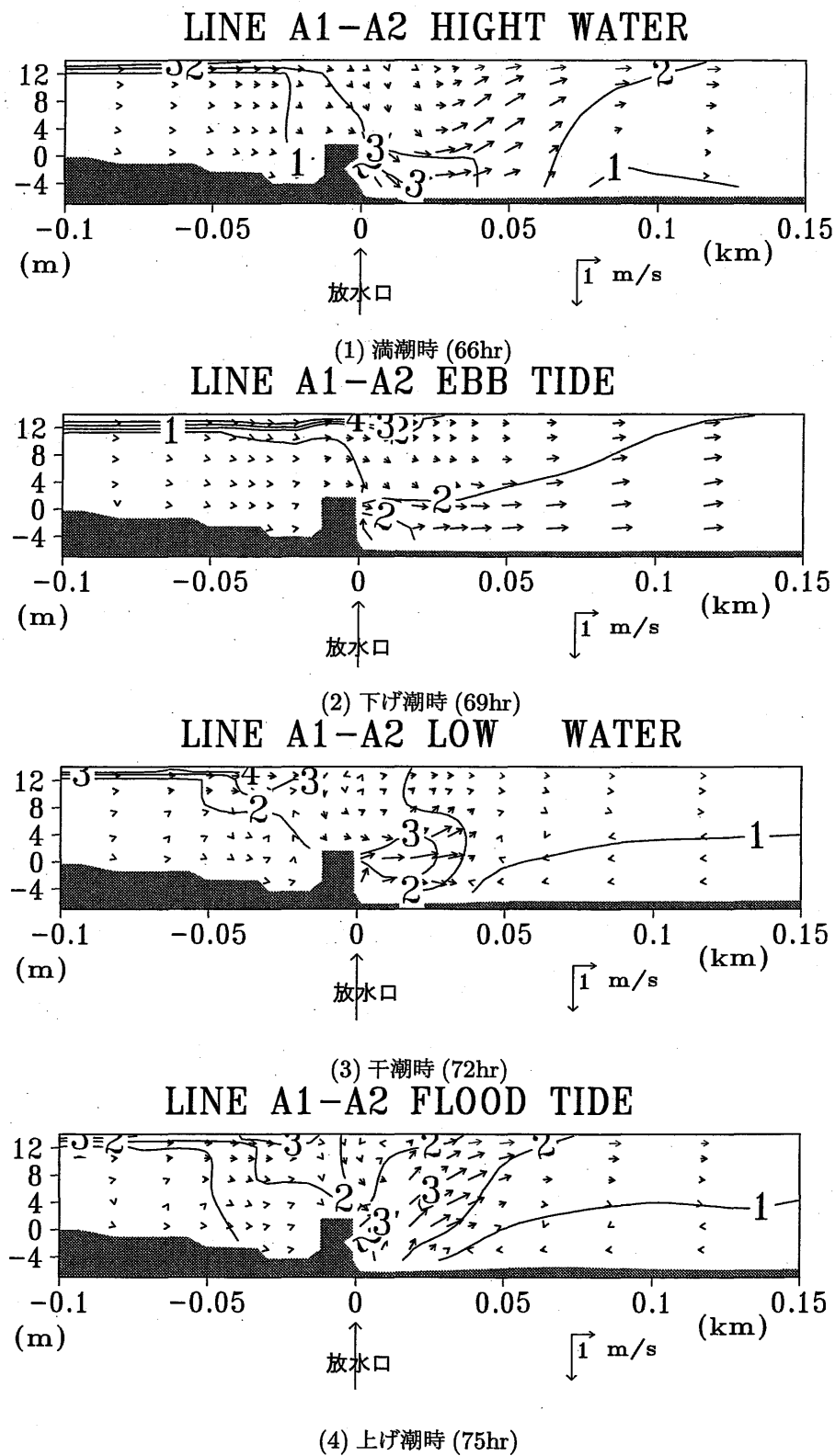


図 4.17 各潮時での A1-A2 上の縦断図 (計算結果)

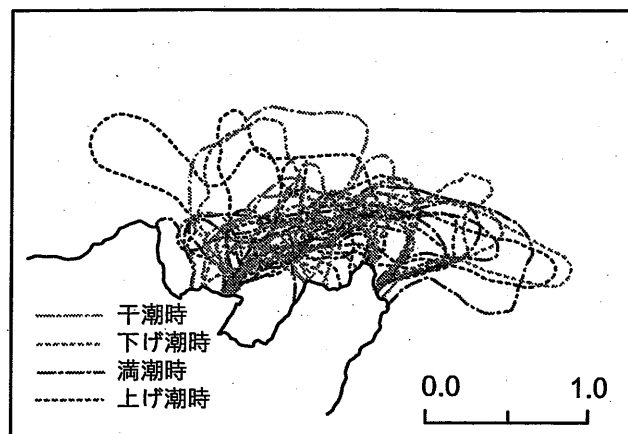


図 4.18 平成 6～10 年度のモニタリング結果 (冬季, またはフル稼働時)

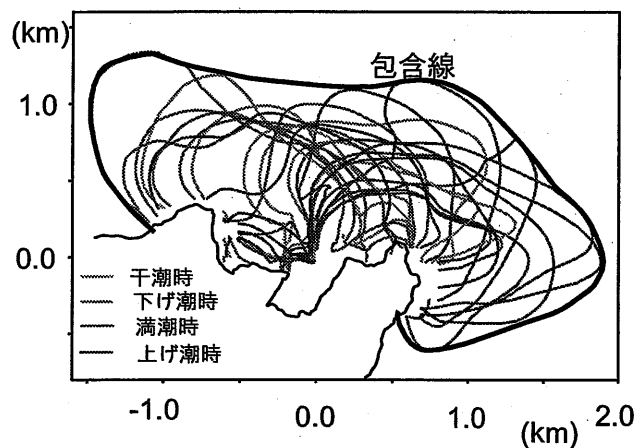


図 4.19 水温 1 度上昇範囲 (フル稼働時の計算結果)

160m³/s) の同時放水) で計算を行い, 温排水の拡散範囲を予測している. そのため図 4.19 の結果は, 潮汐 1 周期間 (24 時間), 1 時間毎の表層での水温 1℃上昇範囲, およびこれらの結果を包含するコンターを示している.

計算ケース 2 の全潮時の 1℃上昇範囲は, 汀線・沖合い方向ともに, モニタリング結果と同程度の拡散範囲を示し, モニタリング結果を包含した結果となる. 以上の結果より, 本報告で示した 3 次元温排水拡散モデルは, 潮汐が卓越する海域における, 表層・水中同時放水された温排水の温排水拡散範囲予測に, 適用可能であると考えられる.

4.5 まとめ

本研究では, 実海域において水中・表層放水口から同時放水される温排水の拡散挙動の把握を対象に, 観測および数値モデルによる検討を行った. まず, 水中・表層放水口が近接設置された地点での海域について, 水温および流速の観測を行った. 次に, 潮汐が卓越する海域を対象として計算を行うために, 潮流

を考慮出来るように3次元温排水拡散予測モデルの改良を行った。そして、観測海域を対象に、本モデルを用いて温排水拡散予測計算を行い、水中放水口近傍における、表層・水中放水された温排水の拡散形態を検討した。最後に、対象海域について温排水拡散範囲予測を行い、モニタリング結果と比較検討により、本モデルの適用性について検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

1. 近接した表層・水中放水口から同時放水される温排水の拡散形態・挙動を把握するため、湾奥に表層放水口・湾口に水中放水口が近接設置されている海域において観測を行い、各潮時での温排水の拡散パターン、および水温の鉛直分布の変化について検討を行った。

- 本海域の潮汐流は、上げ潮・満潮時において北流となり、下げ潮・干潮時において南流となる。水中放水口からの温排水の軸は、この潮汐流と地形の影響により変化し、水中放水された温排水は、上げ潮・満潮時(①の潮時)では北側の岸に接近して拡散し、下げ潮時・干潮時(②の潮時)では水中放水の方向に拡散する。水中放水口より南側の海域では、①の潮時において外海から湾口への速い流れが観測され、温排水によるフロントが形成される。②の潮時では、この流れが微弱となり、フロントが南側に移動する。
- 湾奥に設置された表層放水口からの温排水は、湾内では上層で高い温度となり、下層では低減する鉛直分布となるが、湾口に到達すると、潮時により、水中放水された噴流の軸上で、水中放水の流速・乱れの影響を受けて混合・希釈し、鉛直方向に一樣な分布となる場合と、水中放水の影響を受けず、湾内と同様の鉛直分布となる場合がある。
- 湾内からの表層放水起因の温排水は、①の潮時では、水中放水起因の温排水と同方向に拡散するため、鉛直方向に混合・希釈するが、②の潮時では、水中放水起因の温排水と同方向に拡散するとともに、温排水と環境水とのフロントが南下した海域に、水中放水の影響を受けずに拡散する。このため、湾口前面での温排水の鉛直分布は、湾内で観測された表層放水起因の鉛直分布と水中放水された噴流により鉛直混合した鉛直分布とが、横断方向に存在する。そして、②の潮時では、湾内からの表層放水起因の温排水が拡散する領域に、水中放水された温排水が下層の環境水を巻き込みながら浮上し、浮上点付近の水温を低減させることから、海表での水温上昇域は双峰の凹型の拡散分布となる。

2. 潮汐が卓越する海域を対象として計算を行うために、潮流を考慮出来るように3次元温排水拡散予測モデルの改良を行った。そして、観測海域を対象に、本モデルを用いて温排水拡散予測計算を行い、水中放水口近傍における、表層・水中放水された温排水の拡散形態を検討した。

- 本モデルでは、計算時間短縮のために、噴流による水面変動を考慮せず、潮汐による水面変動のみを再現するモデルで計算を行った。このモデルで得られた潮汐の潮流楕円は、水位を計算する準3次元モデルと同程度の再現性を示した。
- 水中放水口からの噴流は、潮時によって、底面を這いながら拡散するパターン(パターン①)と放水直後に浮上するパターン(パターン②)に変化する結果となった。この結果に対応して、温排水の浮上点位置は、パターン①では沖合いに、パターン②では水中放水口の近くに変化し、水中放水口からの温排水の浮上経路が潮汐により変化する結果となった。
- 計算で得られた表層での流速分布、上昇水温の水平分布、鉛直分布は、観測で得られた知見(C崎西側の湾外から湾内に流れ込む連行水、上昇水温1℃以上の温排水がA崎に拡散する特徴、水中放水口近傍での鉛直分布)と定性的に一致した。また、計算結果は、表層での温排水

の浮上点位置、浮上点付近の流速結果について、観測結果とほぼ一致した。

3. 対象海域について温排水拡散範囲予測を行い、当該発電所が平成6～10年に実施したモニタリング結果と比較し、本モデルの実海域への適用性について検討を結果、以下のことが分かった。

- 水温の上昇範囲について、モニタリングによる水温1℃上昇範囲と比較した結果、本モデルの予測範囲は、汀線・沖合い方向ともに、モニタリング結果と同程度の範囲となり、モニタリング結果を包含した結果となった。

以上の結果より、本報告で示した3次元温排水拡散モデルは、潮汐が卓越する海域における、表層・水中同時放水された温排水の温排水拡散範囲予測に、適用可能であると考えられる。今後は、本モデルの適用事例を増やすことにより、モデルの汎用性を高める必要があり、5章において、これら汎用性の検討を行う。

参考文献

- Mizutori, M., T. Tsubono, N. Nakasiki, S. Matsunasi, S. Sakai and K. Maruyama, 2000: 3-DIMENSIONAL DIFFUSION CHARACTERISTICS OF A SURFACE FORCED PLUME IN COASTAL SEA. *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, **18**, 145-156.
- Nakashiki, N., S. Matsunashi, S. Sakai, T. Tsubono and K. Maruyama, 1996: Behavior of a horizontal buoyant jet discharged from a multiple pipe. *Flow Modeling and Turbulence Measurements VI*.
- Riddle, A. M. and R. E. Lewis, 2000: Dispersion Experiments in U. K. Coastal Waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **51**, 243-254.
- 高田英明, 田中等, 牛島省, 1999: 俯角方向に水中放水される温排水の移流拡散過程に関する研究. 水工学論文集, **43**, 917-922.
- 坂井伸一, 松梨史郎, 仲敷憲和, 坪野考樹, 丸山康樹, 1997: 3次元 $k-\epsilon$ モデルによる沿岸域における水平重力噴流の計算. 水工学論文集, **41**, 537-542.
- 水鳥雅文, 坪野考樹, 坂井伸一, 仲敷憲和, 松梨史郎, 1999: 沿岸域に表層放水された重力噴流の3次元特性. 水工学論文集, **43**, 911-916.
- 中辻啓二, 許再寧, 室田明, 1991: 三次元表層密度流の数値実験. 土木学会論文集, **363II-4**, 107-113.
- 坪野考樹, 仲敷憲和, 丸山康樹, 1997a: 複数管から放出された水平重力噴流の特性, 一実験による現象解明と3次元数値計算法の適用性一. 研究報告:U 97057, 電力中央研究所.
- 坪野考樹, 仲敷憲和, 松梨史郎, 坂井伸一, 丸山康樹, 1997b: 複数管から放出された水平重力噴流に関する数値シミュレーション. 水工学論文集, **41**, 295-302.
- 坪野考樹, 松梨史郎, 角湯正剛, 1999: 水中放水及び表層放水混在場での温排水拡散挙動. 水工学論文集, **43**, 923-929.
- 坪野考樹, 松梨史郎, 平口博丸, 2000: 表層・水中放水口から同時放水された温排水の拡散形態. 海岸工学論文集, **47**, 1016-1020.
- 都築進, 大久保嘉雄, 川永充人, 安達欣也, 水鳥雅文, 1992: 大容量発電所における温排水拡散実態について. 海岸工学論文集, **39**, 940-944.
- 福島武彦, 村岡浩爾, 1981: 浅い湖におけるセイシュの観測とそのモデル化. 水工学論文集, **25**, 577-583.
- 片野尚明, 河村博美, 1978: 単一水平管による温排水の水溫低減化に関する研究. 研究報告:U 377021, 電力中央研究所.

第5章

複雑な放水口形状に適用するためのネスティング手法を用いた数値モデルの効率化

5.1 はじめに

3次元温排水拡散予測モデルの開発に取り組み、2章から4章までにおいて、さまざまな放水条件（表層放水単独、水中放水単独、表層水中同時放水の条件）における温排水拡散について本モデルを適用してきた。また、計算により得られた放水口近傍の流れ・水温分布、表層での拡散分布について実験・観測結果と比較検討し、本モデルの適用性を示してきた[坪野ら,1997a,1997b,2000b; 仲敷ら 1996; 坂井ら,1997, 水鳥ら,1999]。

放水された温排水の拡散形態は、温排水が放水口近傍での噴流として混合・希釈する放水口の近傍域と、流下するにつれて運動量の効果が小さくなり、海域の流動・拡散によって拡散される遠方域の2つに分けられる。これら各領域を効率および精度良く予測するために、幾つかのモデル化を行い、3次元温排水拡散予測モデルの開発を行ってきた。具体的には、放水口近傍域の温排水の拡散挙動を精度よく予測するために、放水口を少なくとも1つ以上のメッシュで模擬し、 $k-\epsilon$ モデルを使用するモデルとし、遠方の温排水の拡散挙動を精度よく予測するために、海岸地形を精度よく再現できるよう Favor 法を用いるモデルとした。

しかし、本モデルを現地に適用する場合、上述した近傍域におけるモデルの高精度化と海域での拡散特性の2つの理由により、多大な計算時間を要する。なぜならば、本モデルでは、水中放水口の場合では最小のメッシュサイズが1~2mのオーダーとなることから、不等間隔メッシュを用いてもメッシュ数が多くなり、さらに計算条件により時間間隔を短くする必要がある。特に放水口が複数管によって構成される場合では、放水口周辺を再現するために、さらにメッシュ数が多くなる。また、温排水の海表面での拡散範囲は、海域の流動・拡散で支配されることから、温排水の拡散範囲が定常となるまでに放水開始後3日から5日程度かかる。

このようにメッシュ数が多いモデルにおいて、ゆっくりと海表面を拡散していく温排水拡散の計算を行うと、計算時間は当所の富士通社製スーパーコンピュータ VPP5000 で3日から10日程度必要となる。温排水拡散範囲予測を行う場合では、本計算の前に、予備検討である各係数（水平・鉛直、渦動粘性・拡

表 5.1 3次元温排水拡散予測モデルモデルの各変数の計算時間割合

変数	計算時間の割合 (%)
圧力計算 (p)	27
乱流エネルギー (k)	23
散逸率 (ϵ)	17
流速 (u, v, w)	17
水温 (T)	10
その他	6

散係数など) の設定, および放水条件の設定において試行錯誤的な計算が必要となり, 計算時間の制約から迅速な予測が行えない。

以上のような背景から, 本モデルの計算時間の短縮化が課題となっている。一般的に計算時間の短縮化を行う場合, 数値モデルの簡略化と格子点数の減少が考えられる。モデル簡略化の点から考えると, u, v, w, p, T は予測変数であるため簡略化するのは難しく, 2 方程式モデルである $k-\epsilon$ モデルを乱流エネルギーのみを計算する 1 方程式モデルに変更することが考えられる。

表 5.1 に, 全体の計算時間のうち各変数の計算時間を示す。この表から散逸率 ϵ の計算時間を見ると計算時間全体の 17 % でしかなく, この計算を省略したとしても 1.2 倍程度しか計算時間を短縮できない。

格子点数減少化を考えると, 海岸線に沿った任意曲線を用いた一般座標系のモデル [例えば, Bao et al. 2000; Ye et al. ,1997; Lin et al. ,1995; 横山ら,2001; 細田, 2001; 谷口ら, 1989], 非構造格子を用いたモデル [例えば, 谷口ら,1990; 川池ら,2000] などのように, 複雑な地形にたいしてメッシュの幅を小さくせずに解く方法と, 詳細に解きたい周辺で新たにメッシュを作成して粗いメッシュに接続するネスティングの方法 [例えば, Borthwick ら,2001; 二瓶ら,2000,2003; 田中ら,2000] がある。

一般曲線座標系, および非構造格子を用いたモデルでは, モデルのコードを大きく変更しなければならない。さらに, 一般座標系のモデルや非構造格子を用いたモデルでは, 格子作製を半手動で行うため, 本計算を行う前に多大な時間と労力を要し, 全体的な計算時間短縮化を考慮すると, これら 2 つの方法を用いることは有効ではないと考えられる。

ネスティングを用いた方法は, 粗いメッシュの広領域と細かいメッシュの小領域を接続して計算する方法であり, この方法には上位と下位の計算領域を逐次的に計算する方法である 1-way ネスティング [例えば, 二瓶ら,2000,2003; 田中ら,2000] と上位と下位の計算領域を同時に解く方法である 2-way ネスティング [例えば, Borthwick ら,2001;Rogers ら,2001] の 2 つ方法がある。

ネスティングを用いる利点は, 全点を詳細なメッシュで表さなくてすむため計算点を減らせること, およびコードの大幅な変更が必要ないことがある。また, 1-way ネスティングであれば, メッシュ幅が大きくなるので, 時間間隔を大きく取ることが可能となり, 計算点の減少とあわせてさらなる時間短縮が可能となる。そして, 2-way ネスティングであれば, 上位の計算領域と下位の計算領域を並列化することにより別の CPU で計算することが可能であり, さらなる時間短縮が可能となる。

ネスティングを 3 次元温排水拡散モデルに用いるさらなる利点は, 放水口近傍では, 放水口の口径程度の空間スケールをもつ噴流を計算するために細かなメッシュ幅で計算しなければならないが, 温排水の拡散範囲に影響をおよぼす放水口より離れた海域では, 放水口近傍の海域に比べて空間的に大きいことが予測されるため, 放水口より離れた海域のメッシュを大きくしても, 予測される拡散範囲の精度が変わらな

いことが予想される点である。

以上の理由から、ネスティング法を用いることにより、本モデルの時間短縮を行う。本研究では、まず3次元温排水拡散モデルを1,2-way ネスティングモデルに改良するために、大領域と小領域の接合する位置において各変数の内挿計算を行えるように計算コードを変更した。

これまでの2-way ネスティングモデルの研究(例えば, Borthwick ら,2001;Rogers ら,2001)では、静水圧近似を用いたモデルを使用しているため、大・小領域の圧力計算を同時に解く必要がなかったが、本モデルでは、圧力計算においてポアソン方程式を大・小領域で同時に計算しなければならないため、本研究では、名古屋(2000)の論文を参考に、圧力・流速同時緩和法を採用して、計算コードの改良をおこなった。

二瓶らが構築した、また田中らが使用した1-way ネスティング法を用いたモデルでは、大領域で得られた計算結果を小領域に与えて計算を行い、小領域の現象を再現している。一方、3次元温排水拡散モデルにネスティングを行う場合では、放水口から放水された温排水の影響を小領域で詳細に計算しておき、その結果を用いて大領域での温排水拡散の計算を行う。小領域の計算範囲を小さくすると、放水口近傍での噴流として混合希釈している領域での温排水を正確に予測できず、大領域で計算される拡散範囲が正常に予測できない。そこで、本研究では、計算時間の検討とともに小領域の設定の検討を行った。実際には、海域に流れのない状態で温排水が放水される計算をネスティングモデルを用いて計算し、温排水の拡散範囲が正常に計算できる小領域の大きさについて検討を行った。そして、潮流が卓越した海域について計算を行い、計算時間の検討とともに、ネスティングモデルの拡散範囲を従来のモデルの結果と比較することにより、ネスティングモデルの適用性について検討を行った。

次節において、モデルの概略とネスティング方法、また3節において静止場に温排水が放水される場合におけるネスティングの小領域の範囲、および計算時間の検討を行う。そして、4節において潮流がある場合の計算結果および計算時間について検討を行い、5節においてまとめを行う。

5.2 3次元数値モデルのネスティング方法

本章では、放水口近傍の詳細なメッシュ系を用いた小領域と、遠方域の粗いメッシュ系を用いた大領域を接続して計算を行う。そのため、本ネスティングモデルでは、複数ブロックのメッシュ系の接合部において、有限体積法に基づき流量保存則と熱量保存則を満足させるように構築した。本節において、従来のモデルから改良を行った1-way・2-way ネスティングモデルの説明を行う。

5.2.1 ネスティングにおけるアルゴリズム

1-way ネスティングの計算工程、および2-way ネスティングのアルゴリズムを、以下に示す。

(1-way ネスティングの計算工程)

1. 前章までに述べたモデルで、全領域の計算を行う。
2. 図5.1に示すように小領域と大領域を接合する。
3. 大領域と小領域の接合面で、1.で計算されたフラックス・流量を大領域のコントロールボリューム上で面積分し、この値を境界条件として大領域の計算を行う。

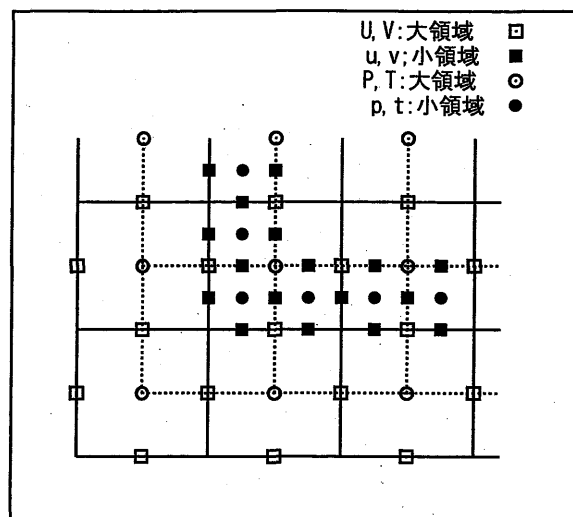


図 5.1 大領域と小領域の接続

(2-way ネスティングのアルゴリズム)

1. 図 5.1 に示すように小領域と大領域を重ねて接合する。
2. 小領域の計算を行う。
3. 大領域と小領域の接合面で、2. で計算されたフラックス・流量を大領域のコントロールボリューム上で面積分する。
4. 3. の結果を境界条件として大領域の計算を行う。
5. 流速の計算であれば、小領域と大領域の流速が連続式を満たすようにポアソン方程式を計算する。さらに、圧力値を用いて、流速の補正を行う。
6. 小領域の接合部での格子点に、大領域と小領域の結果を用いた内挿結果を設定する。
7. 2. に戻る。

1-way ネスティングモデルでは、従来のモデルで全域を計算しておき、その結果から内挿した流量・フラックスを大領域の粗いメッシュの境界上に設定して計算を行う。そのため、小領域から大領域へ方向にしか流速、水温などの情報が伝わらないことから、1-way ネスティングと記述した。

2-way ネスティングモデルでは、アルゴリズムの 3. で小領域から大領域へ、6. で大領域から小領域へ情報が伝達される。このことから、2-way ネスティングと記述した。また、5. の計算で大・小領域について連続式を満たすように計算されることから、結合部での流量保存則が満足される。また、2-way モデルでは、このアルゴリズムを多段階つなげることにより、複数のネスティングを可能なコードとした。

5.2.2 内挿法

小領域計算で用いたフラックス、得られた流量の積分値を大領域の境界に設定することにより、小領域から大領域へ情報の伝達を行った。このとき、小領域と大領域とが重なる位置において、計算点が異なることから、情報の伝達において内挿が必要となる。この内挿法について、以下に説明を行う。

図 5.2 に、スカラー量・流量の大小領域の計算点および小領域から大領域へネスティングするフラックス、流量の位置 (2 重三角) を示す。スカラー量の計算では、小領域の計算で使用したフラックスをアル

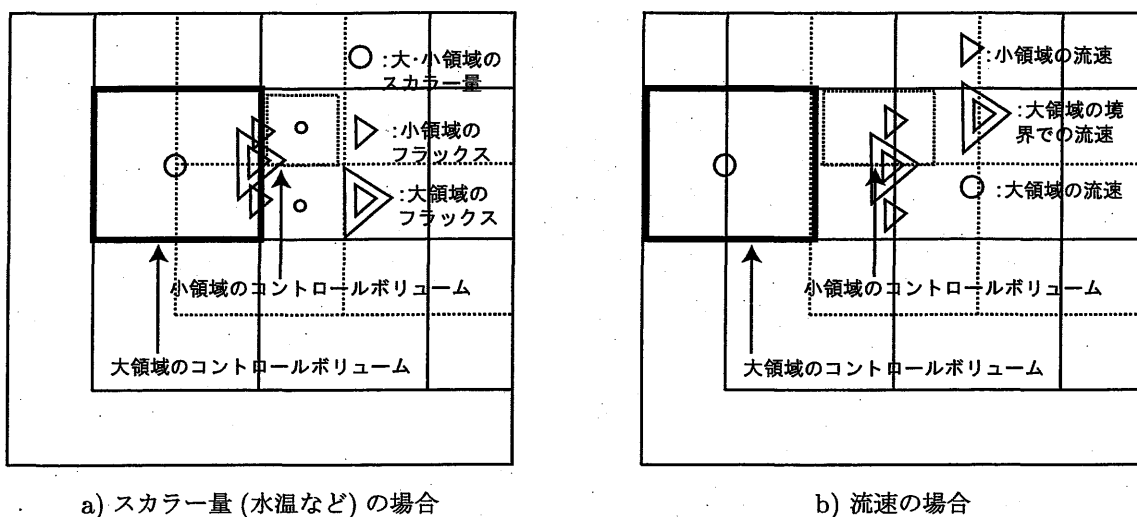


図 5.2 小領域から大領域へのフラックス流量の受け渡し

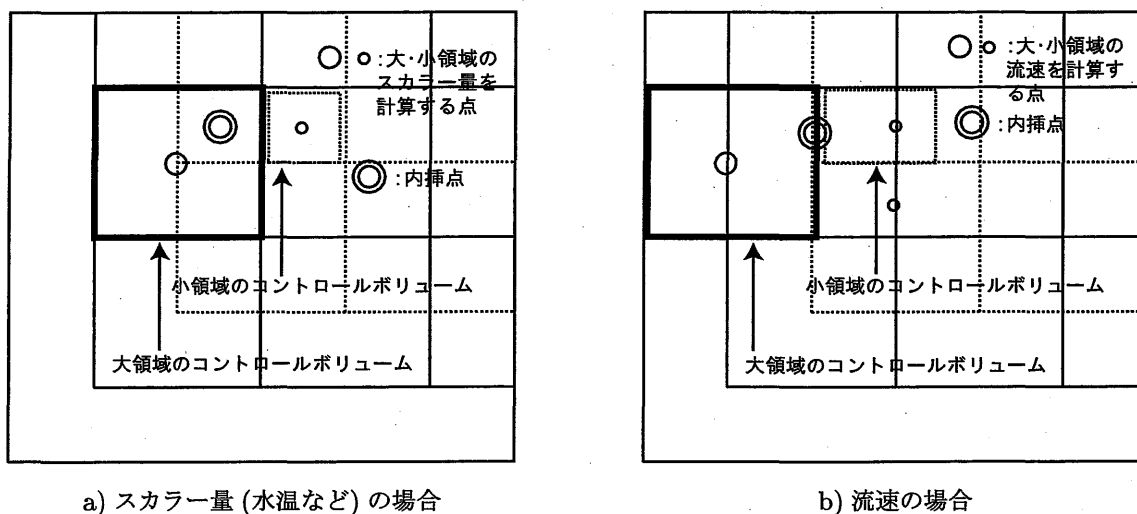


図 5.3 内挿点

ゴリズムの 2. の段階で保存しておき、大領域のコントロールボリュームでフラックスの総量を計算し、大領域の境界上にフラックス (図 5.2a) の 2 重三角) を与える。流速の計算では、アルゴリズムの 2. で計算された小領域の流速 (図 5.2b) 上の三角) の総量を計算し、大領域の境界上に流速 (図 5.2b) の 2 重三角) を与える。

大領域の値と小領域の値との内挿値を小領域の境界に設定することにより、大領域から小領域へ情報が伝達される (アルゴリズムの 6.)。図 5.3 に、スカラー量・流速の大小領域の計算点 (丸) および内挿点 (2 重丸) を示す。なお、流速計算では、接合部での小領域のコントロールボリュームが長方形となる。内挿計算では、スカラー量・流速ともに、大小領域の境界から 1 つ内側に入った値を用いて空間内挿し、その結果を小領域の境界値 (2 重丸) に与えた。

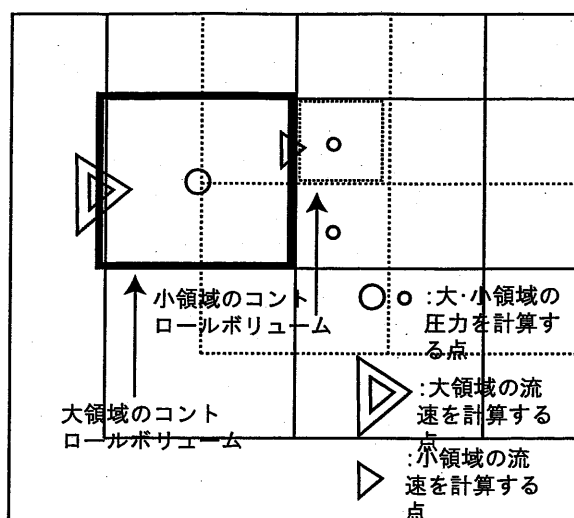


図 5.4 接合部での圧力計算で用いた計算点

5.2.3 圧力計算

従来の3次元温排水拡散モデルでは、SMAC法を適用したPoisson方程式を、連立1次方程式から行列を構成し、適当な行列ソルバー (ICCG法) を用いて計算している。この方法では、行列表現を用いており、全要素を1次元に配置して解くため、従来のモデルのように構造メッシュ系で表現されれば、行列作製が簡易であるが、ネスティングモデルのように、大・小領域の接合部がある場合では、周りの流速の数が不規則となるので、ネスティングの数が増えるたびにプログラムを書き換えなくてはならない。

名古屋 (2000) は、流速圧力同時計算型の共役勾配法を提案し、さらに離散化圧力 Poisson 方程式に対して行列表現を経由しない共役勾配法の算法を提案している。本モデルではこの共役勾配法を用いてモデルの改良を行った。

図 5.4 に大小領域の接合面での流速圧力同時緩和法を行う点を示す。今回のモデルでは、小流域での流速を緩和には、図中の大丸の位置の圧力と小丸の勾配を用い、また大丸の圧力の緩和には、小三角と2重三角を用いた。

5.2.4 大・小領域の接合部における 1,2-way ネスティングの違い

図 5.5 に 1,2-way ネスティングモデルの大・小領域の接合部の模式図を示す。1,2-way ネスティングの大・小領域の接合部は、圧力計算の有無、および大・小領域の情報伝達の仕方の違いにより異なる。

上述したように、1-way ネスティングは既に終了した計算結果から、流量保存則と熱量保存則を満たす条件で、大領域の境界に流速・水温を設定するのに対し、2-way ネスティングでは大・小領域の接合部でフラックス・流量の情報伝達および圧力計算を行う必要がある。そのために、2-way ネスティングの接合部では、1-way ネスティングに比べて厳しい条件が必要となり、1-way ネスティングモデルでは小領域のメッシュが大領域のメッシュと重なる必要がないのにたいし、2-way モデルでは小領域のメッシュの境界が大領域のメッシュ内に納まる必要がある。ただし、大領域内に小領域のメッシュが納まっている限り、

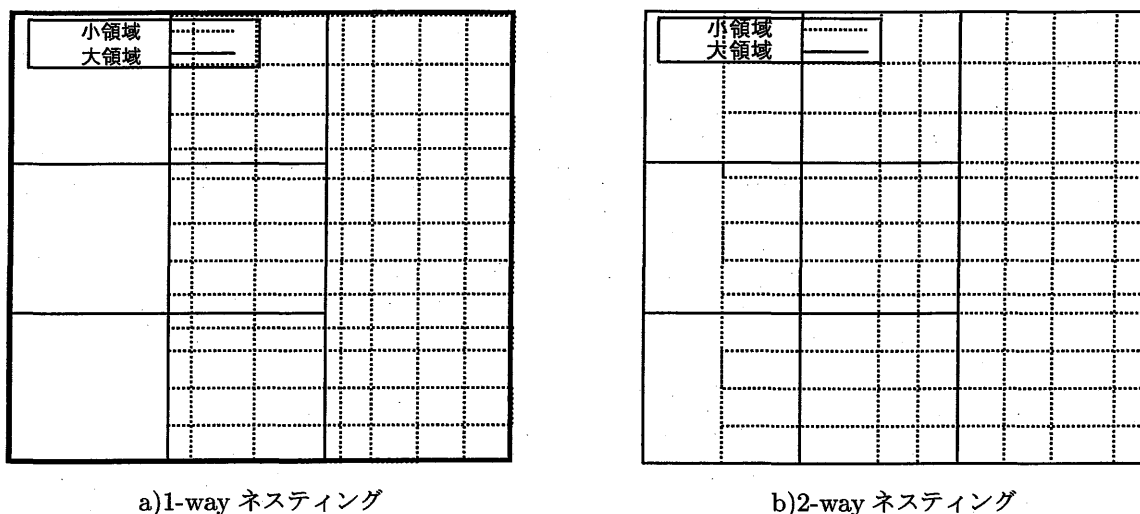


図 5.5 1,2-way ネスティングにおける大小領域の接続

表 5.2 水中放水口の条件

	形式	本数	形状 (幅×高さ)	放水口 間隔	海面下	放水 流速	放水 水温	放水 流量
放水口群 1	複数管	24	長方形 (1.6×1.00m)	15.5m	4m	2.0m/s	16.2°C	約 64m ³ /s
放水口群 2	複数管	4	長方形 (1.6×1.83m)	15.5m	4m	1.8m/s	16.2°C	約 21m ³ /s
放水口群 3	複数管	4	長方形 (1.6×1.83m)	15.5m	4m	1.8m/s	16.2°C	約 21m ³ /s

放水口 2,3 の流量は、長方形のメッシュに流体占有率をかけることで実際の流量と表している。

大領域のメッシュ内に小領域のメッシュ数がいくつあってもかまわないモデルとした。

5.3 1-way ネスティング法の検討

本研究では 2 節で述べたモデルを用いて計算を行い、計算結果および計算時間について検討を行う。

5.3.1 計算条件

本章では、ネスティングによる時間短縮の結果検討を目的としていることから、放水口径が小さく、複雑な放水口から水中放水されている温排水拡散を計算対象とし、実際にある発電所の放水口を模擬し、汀線方向に直線の海岸線を仮定して計算を行った。また、放水口を原点にとり、汀線方向に-2.5~2.5km、沖合い方向に約 3km を計算範囲として、海域に流れのない条件で温排水を放水し、海面での水温分布が定常状態になるまで、計算を行った。

図 5.6 にモデル上で模擬した放水口を、表 5.2 に放水口の条件を、および表 5.3 に海域環境の条件を示す。本研究で模擬した放水口には、放水口径が小さく、放水口の数が多い実際の発電所の中放水口である。図 5.6 に示すように、24 本の放水口群 1、4 本の放水口群 2,3 が汀線に平行に設置され、放水口群 2,3 は放水口群 1 と汀線の間に設置されている。温排水は、環境水温から 7°C 上昇した水温で放水し、全ての

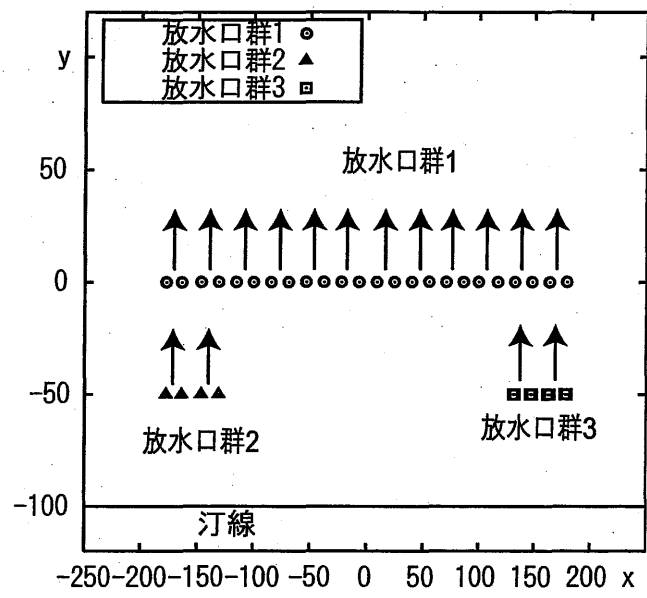


図 5.6 放水口の配置

表 5.3 海域の条件

環境 水温	塩分 濃度	水平粘性 係数	水平拡散 係数	鉛直粘性 係数	鉛直拡散 係数	放熱 係数
9.2℃	30.2	$5. \times 10^4 \text{ cm}^2 / \text{s}$	$1. \times 10^4 \text{ cm}^2 / \text{s}$	$5. \text{ cm}^2 / \text{s}$	$5. \text{ cm}^2 / \text{s}$	$10^{-3} \text{ cal/cm}^{-2} \text{ s}^{\circ} \text{C}$

表 5.4 計算ケース 1

ケース番号	ネスティング	メッシュ幅	計算点	接続位置	物理時間	刻み幅 (dt)	計算機種
ケース 1-0	従来のモデル	1.6 から 100m	21.6 万点		33 時間	0.2 秒	VPP5000
ケース 1-1	1way	100m	2.68 万点	400m	33 時間	20 秒	VPP5000
ケース 1-2	1way	100m	2.65 万点	600m	33 時間	20 秒	VPP5000
ケース 1-3	1way	100m	2.60 万点	800m	33 時間	20 秒	VPP5000
ケース 1-4	1way	200m	0.72 万点	600m	33 時間	30 秒	VPP5000

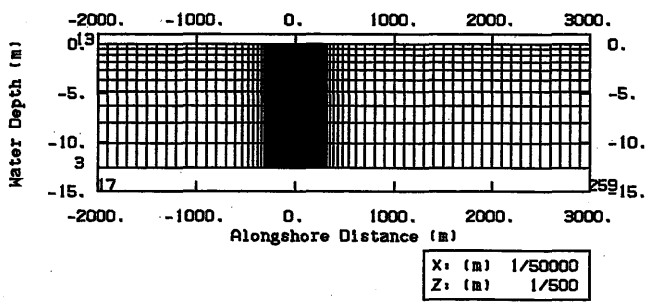
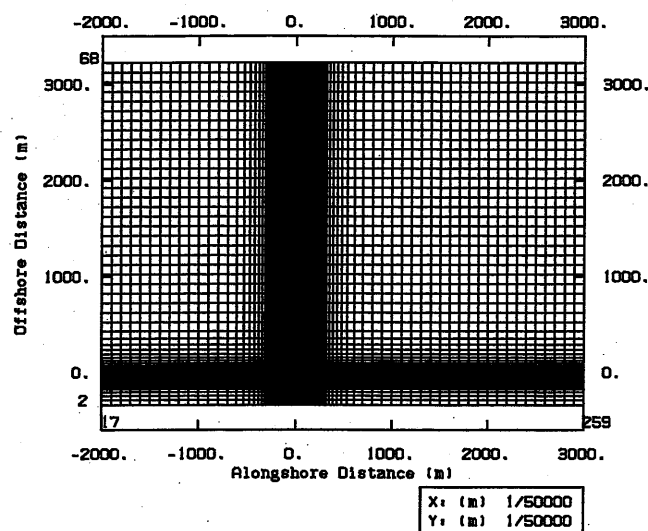
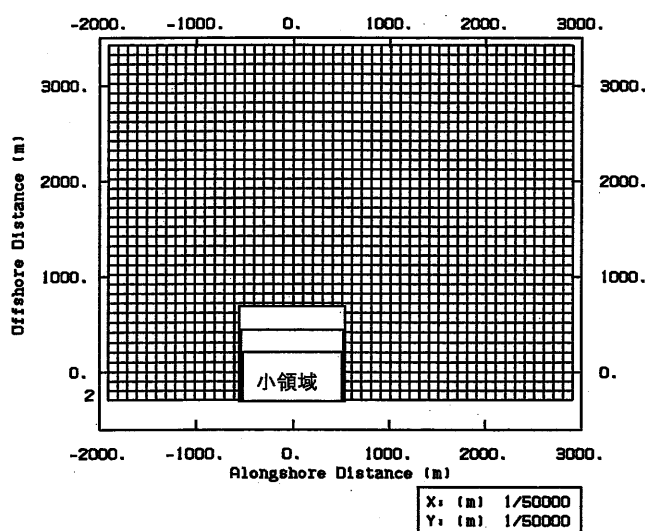


図 5.7 鉛直横断面のメッシュ形状



a) 従来のモデル



b) 1-way ネスティングモデル

図 5.8 メッシュ形状

放水口からの流量は、約 $104\text{m}^3/\text{s}$ とした。

表 5.4 に本章で行った計算ケースを示す。表 5.4 に示すように従来のネスティングを行わないモデルの計算 (ケース 1-0) と接続の距離を変化させてネスティングを行う計算 (ケース 1-1~4) の合計 5 ケースの計算を行った。まず、従来のモデルで計算を行い、この計算結果をネスティングの接合部に設定して、1-way ネスティングモデルの計算を行った。そして、大・小領域の接合部の位置を、放水口から 400, 600, 800m と変化させて 3 種類の計算を行い計算結果の比較を行った。さらに、メッシュ幅を 100, 200m と変化させてメッシュ幅による計算結果の比較も行った。

図 5.7 に鉛直横断面のメッシュ形状を示す。図 5.8 に従来のネスティングモデルを行わない水平方向の

メッシュ、大領域と小領域の接続する距離を変化させたメッシュを示す。図 5.8 に示すとおり水平方向のメッシュは、従来のモデルでは最小メッシュ 1.6m 最大メッシュ 100m 公比 1.2 とする不等間隔メッシュ、ネスティングモデルではメッシュ幅 100m, 200m の等間隔メッシュを用いた。深さ方向はどのケースも同じメッシュを用いており、放水口の大きさを考慮した表層から最小メッシュ 0.5 で公比 1.2 で低層に最大メッシュ 2.6m とする不等間隔メッシュを用いている。

従来のモデルでは、放水口近傍では細かいメッシュ、放水口よりも離れた海域については粗いメッシュとなっているが、離れた海域にも放水口近傍の細かいメッシュが存在する。ネスティングモデルでは、この放水口近傍を中心とするクロス状の細かいメッシュの帯を粗いメッシュで置き換えることによって計算している。これにより、表 5.4 に示すように、計算点が少なくなり、時間の刻み幅を 0.2 秒から 20,30 秒とすることが可能となる。なお、計算点数は、従来のケース 1-0 では 21.6 万点 (汀線方向・沖合い方向・水深方向:244・68・13) で、メッシュ幅を 100m としたネスティングモデルでは 2.78 万点 (汀線方向・沖合い方向・水深方向:55・39・13)、メッシュ幅を 200m としたネスティングモデルでは 0.75 万点 (汀線方向・沖合い方向・水深方向:29・20・13) である。

5.3.2 計算結果

前節で示した条件で放水開始後、温排水拡散範囲が定常になるまでの 33 時間の計算を行った。図 5.9 に表層での上昇水温の水平分布を、図 5.10 に放水口より 1km 沖合いの上昇水温の横断分布を示す。

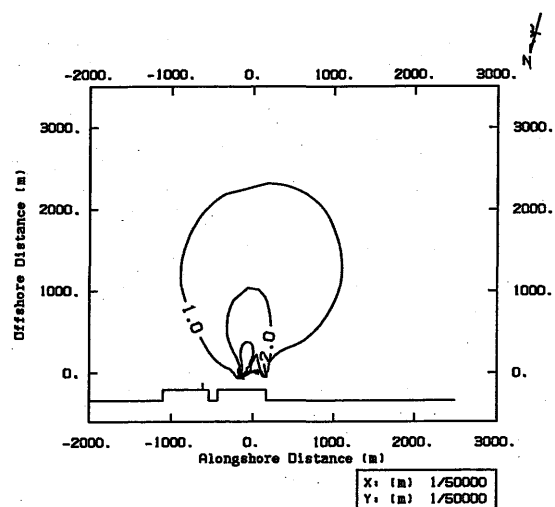
水平分布の結果では、メッシュ幅を 200m としたケース 1-4 において水平分布が横断方向に広がる傾向を示し、全てのネスティングのケース 1-1~4 において、メッシュ幅が従来のモデルよりも広がったために、高温域の分布を示すコンターの間隔が従来の結果に比べて疎となる傾向を示した。しかし、メッシュ幅を 100m としたケース 1-1,2,3 の水温の分布は従来のモデルによる結果と同様な結果となった。また、沖合い方向・汀線方向の水温 1℃ 上昇範囲も従来のモデルの結果 (ケース 1-0) と良く一致した。そして、鉛直分布でも、メッシュ幅を 100m としたケース 1-1,2,3 の水温の分布は従来のモデルによる結果と同様な結果となり、ネスティングすることによる不自然な鉛直方向の混合などは見られなかった。

本報告には図を記載しないが流速・粘性係数の水平鉛直分布でも、各ケースの結果は、従来のモデルと同様な結果となっており、ネスティングによる影響は見られなかった。

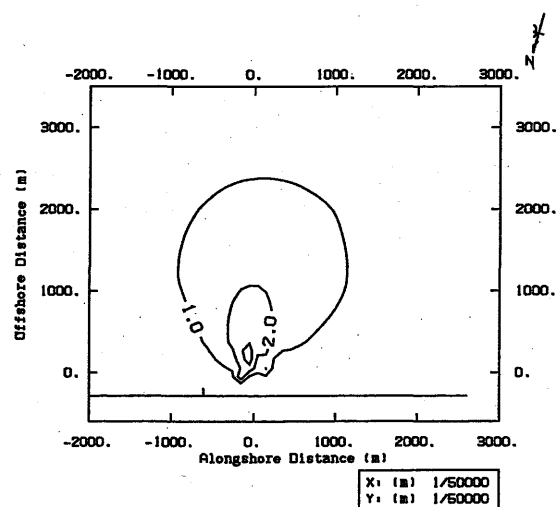
以上の結果から、海域に流れがない場合における温排水拡散予測において、前章におけるアルゴリズムのうち小領域から大領域へ情報を伝達する 3.,4. の工程の精度が確認出来、1-way ネスティングモデルは、従来のモデルと同程度の再現性があることが分かった。

メッシュ幅を 200m としたケース 1-4 の水温分布において、従来のモデルによる計算結果 (ケース 1-0) に比べて、横断方向に広がる傾向が見られ、これは従来のモデルで計算された結果を大領域に設定するときに、接合部で流速・水温に勾配があっても、積分された平均値を大領域に設定するために起こったと考えられる。特に放水口をはさんだ沿岸付近の両サイドでは、噴流の連行作用により放水口へ向かう流れがあり、沖合い方向の流速の勾配が大きいと考えられるが、この勾配の影響はネスティングにおいて消滅し、大領域のモデルでは一様に流れているように設定される。この結果、温排水の拡散範囲が横断方向に広がる結果となる。このネスティングによる流速の一様化の影響は、メッシュ幅を大きくすれば大きくするほど、大きくなるために、放水口および噴流の条件などを勘案してメッシュ幅を設定する必要がある。

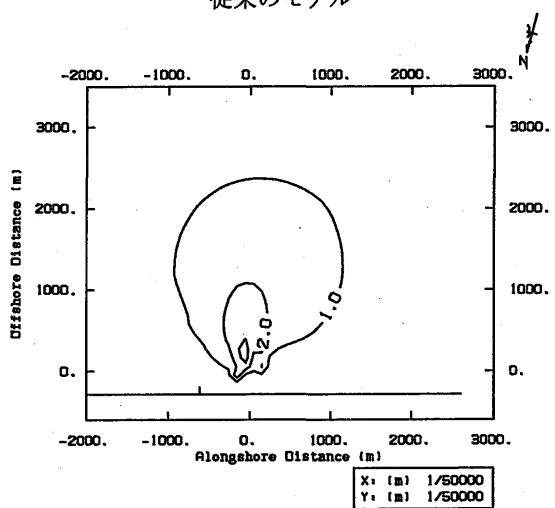
表 5.5 に各ケースの計算時間を示す。なお、従来のモデルおよびネスティングモデルともにベクトル化



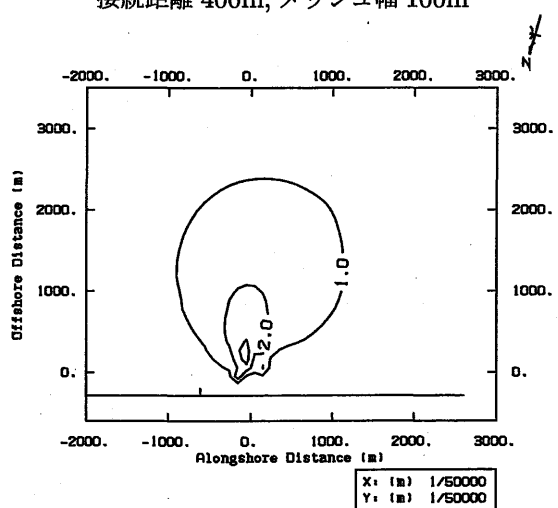
a) ケース 1-0
従来のモデル



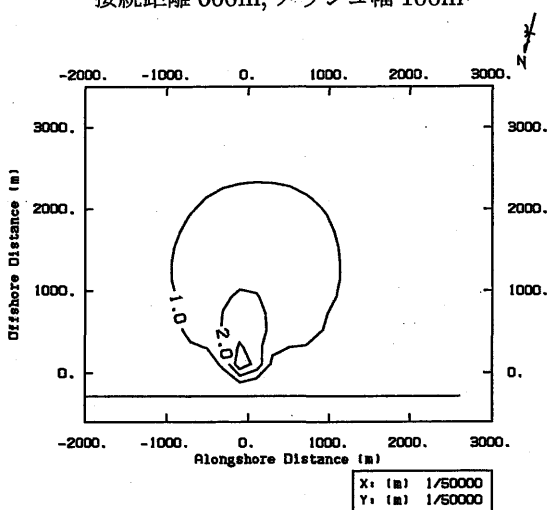
b) ケース 1-1:1-way,
接続距離 400m, メッシュ幅 100m



c) ケース 1-2:1-way,
接続距離 600m, メッシュ幅 100m

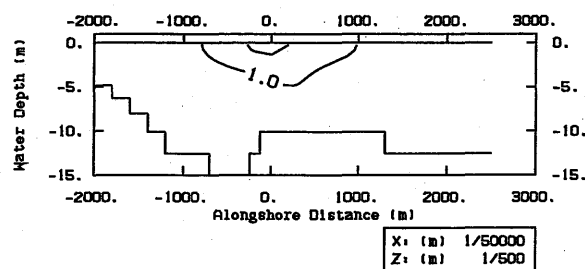


d) ケース 1-3:1-way,
接続距離 800m, メッシュ幅 100m

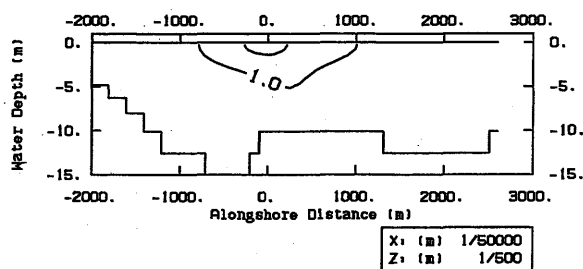


e) ケース 1-4:1-way,
接続距離 400m, メッシュ幅 200m

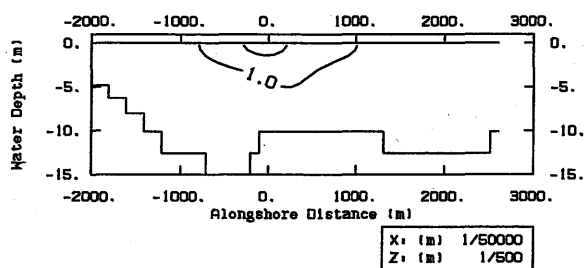
図 5.9 表層での水温の水平分布



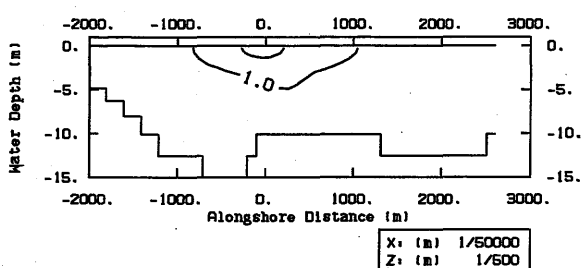
a) ケース 1-0
従来のモデル



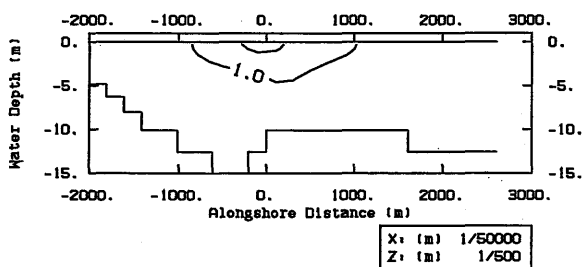
b) ケース 1-1:1-way,
接続距離 400m, メッシュ幅 100m



c) ケース 1-2:1-way,
接続距離 600m, メッシュ幅 100m



d) ケース 1-3:1-way,
接続距離 800m, メッシュ幅 100m



e) ケース 1-4:1-way,
接続距離 400m, メッシュ幅 200m

図 5.10 放水口より沖合い 1km での水温の横断分布

率が約 99 %であった。ここで、実倍率は基本ケース 1-0 の CPU 時間を 1 としたときにどの程度早く計算が可能となったかを示している。また、物理時間/CPU 時間は実際に温排水が拡散する時間に対する CPU 時間を示す。例えばケース 1-0 では、CPU 時間 1 時間で約 0.76 時間しか物理時間が進まないことを示し、定常状態にかかる物理時間が 50 時間のときに必要な CPU 時間は、 $50/0.76 \approx 66$ 時間と見積もられる。

この表を見ると、温排水が放水開始後、定常状態になるまでの 33 時間計算する CPU 時間は、従来のモデルでは 43 時間かかるのにたいし、ネスティングを行ったケースでは約 4 分となった。ネスティングを行うことで、メッシュ点数が 1/10 に下げることが出来、メッシュ幅を大きくとれたことから、時間刻み幅が大きく取ることが可能となり、大幅の効率化が可能となった。

表 5.5 計算時間

ケース番号	ネスティング	メッシュ幅	計算点 (万点)	接続位置	刻み幅 (dt)	CPU ¹⁾ 時間	物理時間 /CPU 時間	実倍率
ケース 1-0	従来のモデル	1.6 から 100m	21.6		0.2 秒	43.7 時間	0.76	1
ケース 1-1	1way	100m	2.68	400m	20 秒	3.6 分	550	728
ケース 1-2	1way	100m	2.65	600m	20 秒	3.6 分	550	728
ケース 1-3	1way	100m	2.60	800m	20 秒	3.5 分	565	748
ケース 1-4	1way	200m	0.72	600m	30 秒	40 秒	2970	3908

1) 放水開始後定常状態になるまでにかかる物理時間 33 時間にかかる計算時間を示す。

表 5.6 計算ケース 2

ケース番号	ネスティング	メッシュ幅	計算点	接続位置	物理時間	刻み幅 (dt)	計算機種
ケース 2-0	従来のモデル	1.6 から 100m	24 万点		60 時間	0.2 秒	VPP5000
ケース 2-1	2way	100m	16 万点	600m	60 時間	0.2 秒	VPP5000
ケース 2-2	1way	100m	4.3 万点	600m	60 時間	10 秒	VPP5000

5.4 2-way ネスティング法の検討

本章では 2 章で述べた 2-way ネスティングモデルを用いて、海域に潮汐流のある条件で温排水を放水する数値実験を行い、計算結果および計算時間について検討を行う。そして、1-way ネスティングを用いて粘性・拡散係数を変えた温排水放水の計算を行とともに、温排水拡散予測を実際に行う場合でのこの 1, 2-way ネスティングモデルを用いた方法を提案する。

5.4.1 計算条件

本章での放水口の条件、海域環境の条件は、前節 5.3 の表 5.2, 表 5.3 と同じ条件である。

表 5.6 に本章で行った計算ケースを示す。表 5.6 に示すように従来のネスティングを行わないモデルの計算 (ケース 2-0)、2-way ネスティングを行う計算 (ケース 2-1)、および 1-way ネスティングを行う計算 (ケース 2-2) の合計 3 ケースの計算を行った。ケース 2-2 の 1-way ネスティングモデルでは、5.3 のケース 1-2 と同じく、大小領域の接合部を放水口からの距離 600m とし、メッシュ幅を 100m とした。ケース 2-2 の大小領域の接合部に設定する流速・水温は、時間ごとに変化させないこととし、5.3 のケース 1-2 と同じ値を設定した。

本節では潮汐流の影響により、前節に比べて温排水の拡散範囲が大きくなるため、計算範囲を汀線方向に 3.5~4.5km、沖合い方向に約 3km とした。そのため、従来のモデル (ケース 2-0) およびネスティングモデル (ケース 2-1,2) では、5.3 で用いたケース 1-0, 1-2 のメッシュの外側に 100m 間隔のメッシュを継ぎ足して計算を行った。

図 5.11 に 2-way ネスティングモデルの水平方向のメッシュを示す。なお、鉛直方向のメッシュは 5.3

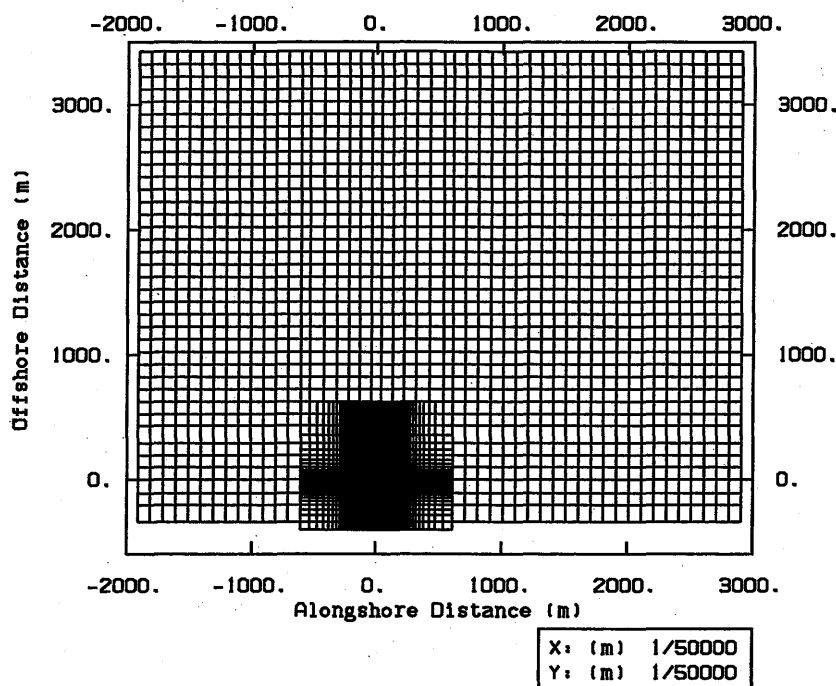


図 5.11 メッシュ形状

と同じメッシュである。計算点数は、従来モデルのケース 2-0 では 24 万点 (汀線方向・沖合い方向・水深方向: $274 \cdot 68 \cdot 13$), 2-way モデルのケース 2-1 では 16 万点 (小領域; 汀線方向・沖合い方向・水深方向: $207 \cdot 43 \cdot 13$, 小領域; 汀線方向・沖合い方向・水深方向: $85 \cdot 40 \cdot 13$), 2-way モデルのケース 2-2 では 4.3 万点 (汀線方向・沖合い方向・水深方向: $85 \cdot 39 \cdot 13$) である。

海域では M2(周期 12 時間) 成分の流動が卓越することとし、前章および坪野ら (2000b) と同様に、まず各ケースの計算範囲を含む湾全体を静水圧近似を用いた準 3 次元モデルで計算した。そして、この計算結果の水面変動を、従来・ネスティングモデルに設定して潮流を駆動した。

5.4.2 計算結果

前項で示した条件で放水開始後、温排水の拡散範囲が定常になるまでの、M2(周期 12 時間) 成分を 5 サイクル・60 時間の計算を行った。

図 5.12 にケース 2-0,1 の各潮時における表層での流速の水平分布を示す。図 5.13 にケース 2-0,1 の各潮時における表層での上昇水温の水平分布を、図 5.14 にケース 2-0,1 の表層での水温 $1 \sim 3^\circ\text{C}$ 上昇範囲を示す。図 5.14 の結果は、潮汐 1 周期間 (12 時間)、1 時間毎の表層での水温 $1 \sim 3^\circ\text{C}$ 上昇範囲を包含するコンターを示している。

各潮時および全潮時における上昇水温の水平分布の結果では、2-way ネスティングを用いたケース 2-1 の水温の分布は従来のモデルによる結果 (ケース 2-0) と良く一致した。

流速の結果も、水温と同様の結果となっており、2-way ネスティングモデルは従来のモデルと同等の性

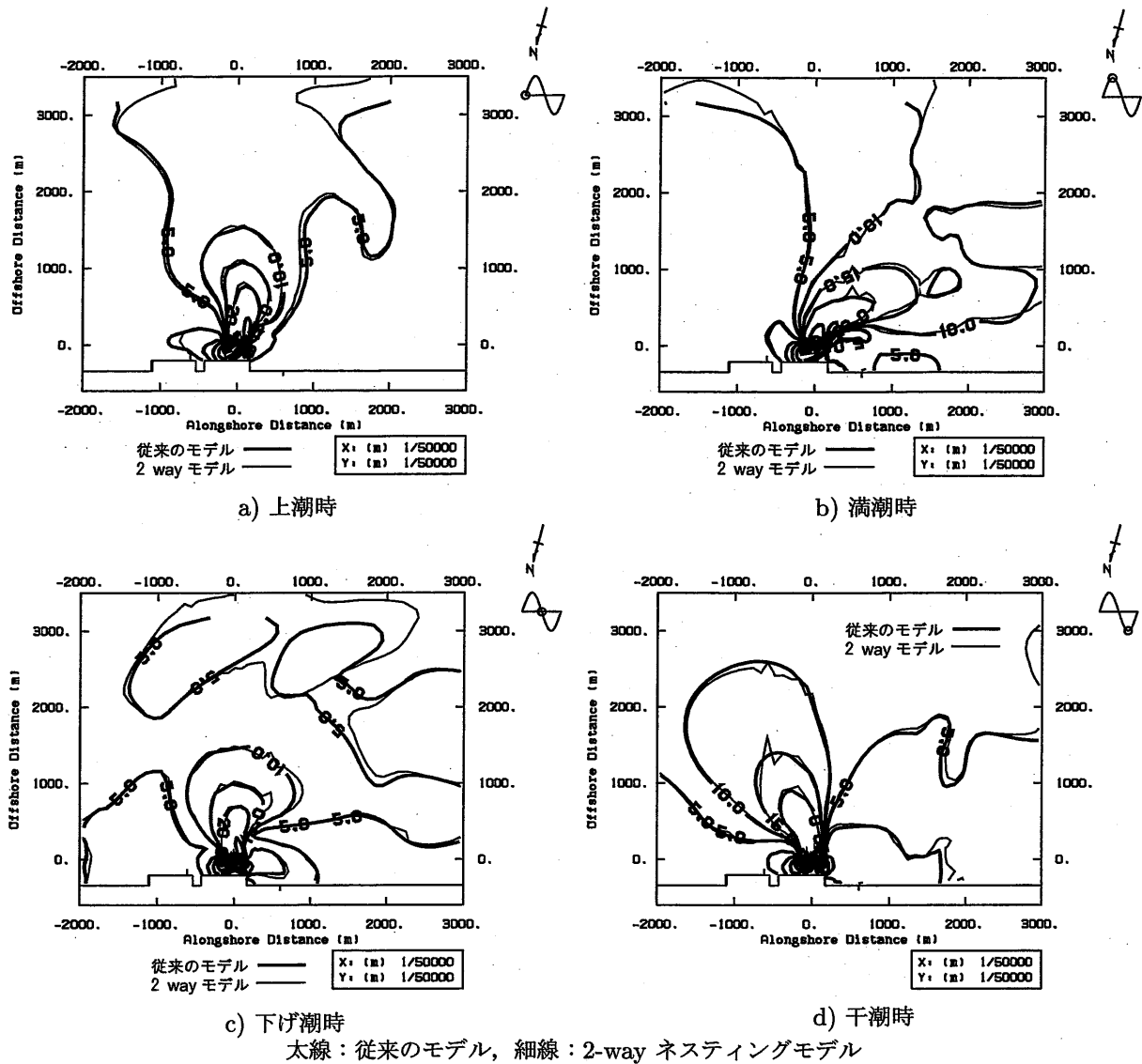


図 5.12 各潮時における表層での流速分布

能をもつことが確認出来た。

図 5.15 にケース 2-2 の表層での水温 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 上昇範囲を示す。1-way ネスティングを用いたケース 2-2 の各潮時における水温分布は、従来のモデルを用いた結果 (ケース 2-0) に比べて、汀線方向には広がらない結果となった。これは、大・小領域の接合部に設定する流速・水温を時間変化せずに、5.3 の定常状態で得られた結果を設定したため、小領域内において潮流の影響を考慮できなかったことが原因である。しかし、図 5.15 での汀線方向の水温上昇範囲は従来モデルの結果図 5.14 に比べて小さくなるが、沖合い方向の到達距離や全体的な形状はほぼ一致しており、1-way ネスティングを用いた方法でも定性的な拡散範囲を予測できると予想される。

表 5.7 に各ケースの計算時間を示す。物理時間 60 時間に対する CPU 時間は、従来のモデルでは 111 時間、2-way ネスティングを行ったケースでは 75 時間となり、2-way ネスティングモデルのメッシュ数が従来のモデルに比べて約 67 % 程度になったことを反映して、2-way ネスティングモデルは約 $1.5 (= 1/0.67)$

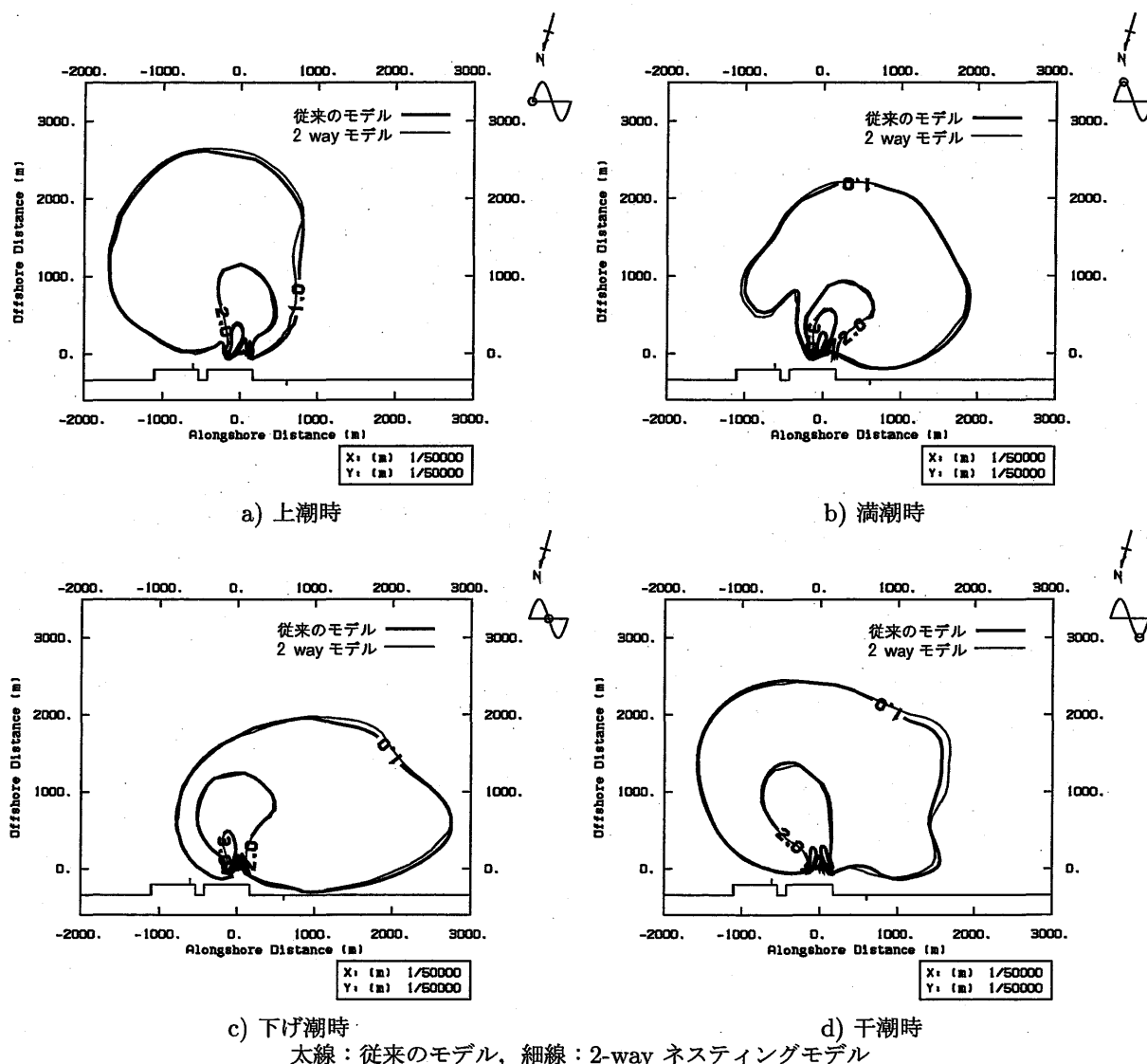


図 5.13 各潮時における表層での水温分布

倍早く計算出来た。これは、2-way ネスティングモデルを用いると、従来のモデルで2回計算する間に3回計算ができることを意味する。また、1-way ネスティング用いたケースでは、CPU 時間が30分と従来のモデルに比べて非常に短縮できる結果となった。

温排水の拡散計算においては、予備計算のために海域の渦動粘性・拡散係数を変化させて行う場合がある。このような場合、2-way ネスティングモデルでは、従来のモデルと同様に係数を変化させて計算することになる。しかし、1-way ネスティングモデルでは、あらかじめ従来のモデルで計算した結果を小領域の結果として、大領域の境界条件として与えることから、小領域（従来のモデルの結果）と大領域（1-way ネスティングモデル）で違う渦動粘性・拡散係数が設定されることになる。

このように場合における、1-way ネスティングモデルの再現性を検討するために、海域の渦動粘性・拡散係数を変化させて数値実験を行った。数値実験では、海域の渦動粘性・拡散係数を変化させた3ケースについて、1-way ネスティングモデルおよび従来のモデルを用いて計算を行い、両者の結果を比較するこ

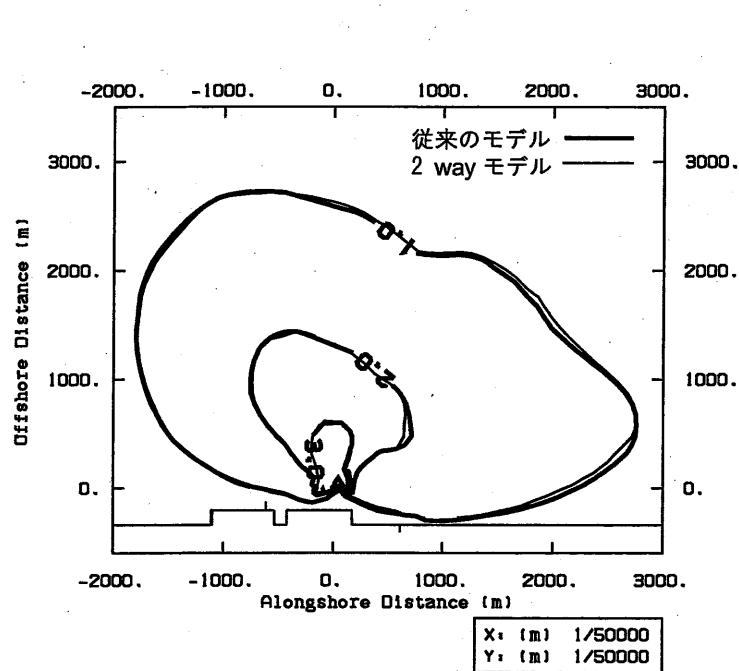


図 5.14 表層での水温 1~3℃上昇包絡範囲:従来モデル,2-way ネスティングモデル

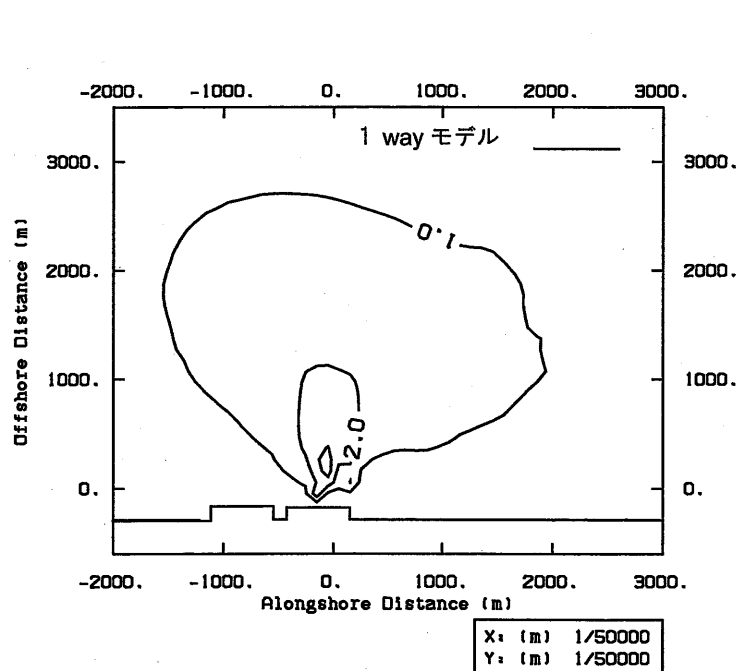


図 5.15 表層での水温 1~3℃上昇包絡範囲:1-way ネスティングモデル

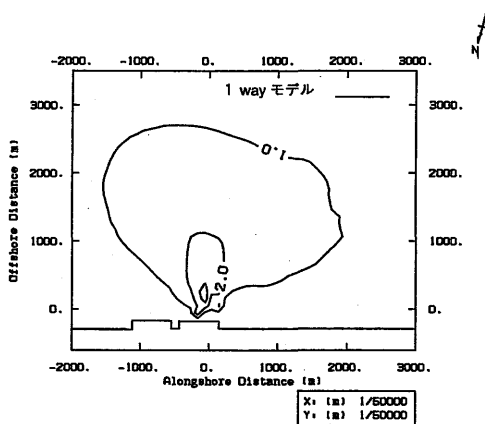
表 5.7 計算時間

ケース 番号	ネスティング	メッシュ 幅	計算点 (万点)	接続 位置	刻み幅 (dt)	CPU ¹⁾ 時間	物理時間 /CPU 時間	実倍率
ケース 2-0	従来のモデル	1.6 から 100m	24		0.2 秒	111 時間	0.54	1.0
ケース 2-1	2way	100m	16	600m	0.2 秒	75 時間	0.8	1.5
ケース 2-2	1way	100m	4.3	600m	10 秒	29 分	120	222

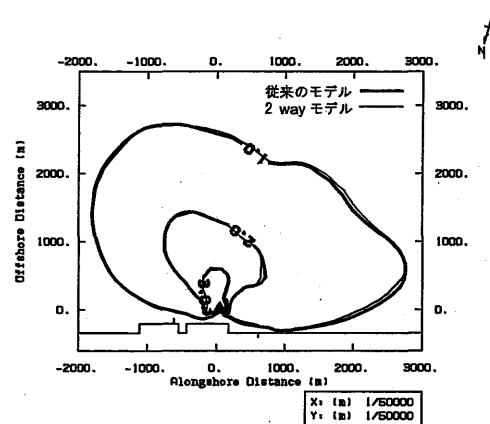
1) 放水開始後定常状態になるまでにかかる物理時間 60 時間にかかる計算時間を示す。

表 5.8 計算ケース 3

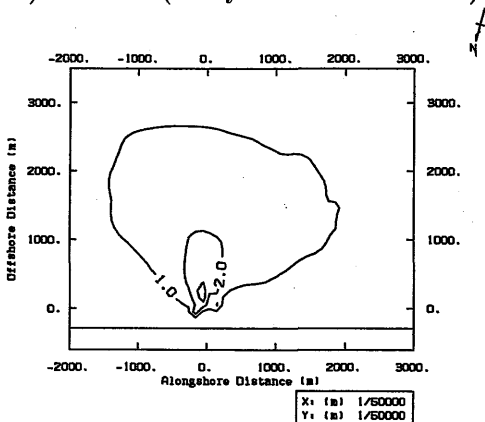
ケース 番号	ネス ティング	粘性係数 (水平)m ² /s	粘性係数 (鉛直)cm ² /s	拡散係数 (水平)m ² /s	拡散係数 (鉛直)cm ² /s
ケース 2-2	1way	5.0	5.0	1.0	5.0
ケース 3-1	1way	1.0	5.0	1.0	5.0
ケース 3-2	1way	5.0	10.0	1.0	10.0
ケース 3-3	1way	1.0	10.0	1.0	10.0



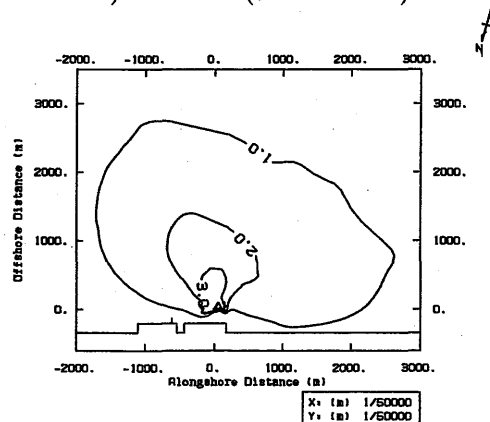
a) ケース 2-0(1-way ネスティングモデル)



a) ケース 2-0(従来のモデル)



b) ケース 3-1(1-way ネスティングモデル)



b) ケース 3-1(従来のモデル)

図 5.16 粘性・拡散係数を計算した結果 (1-way ネスティングモデル, 従来のモデル)

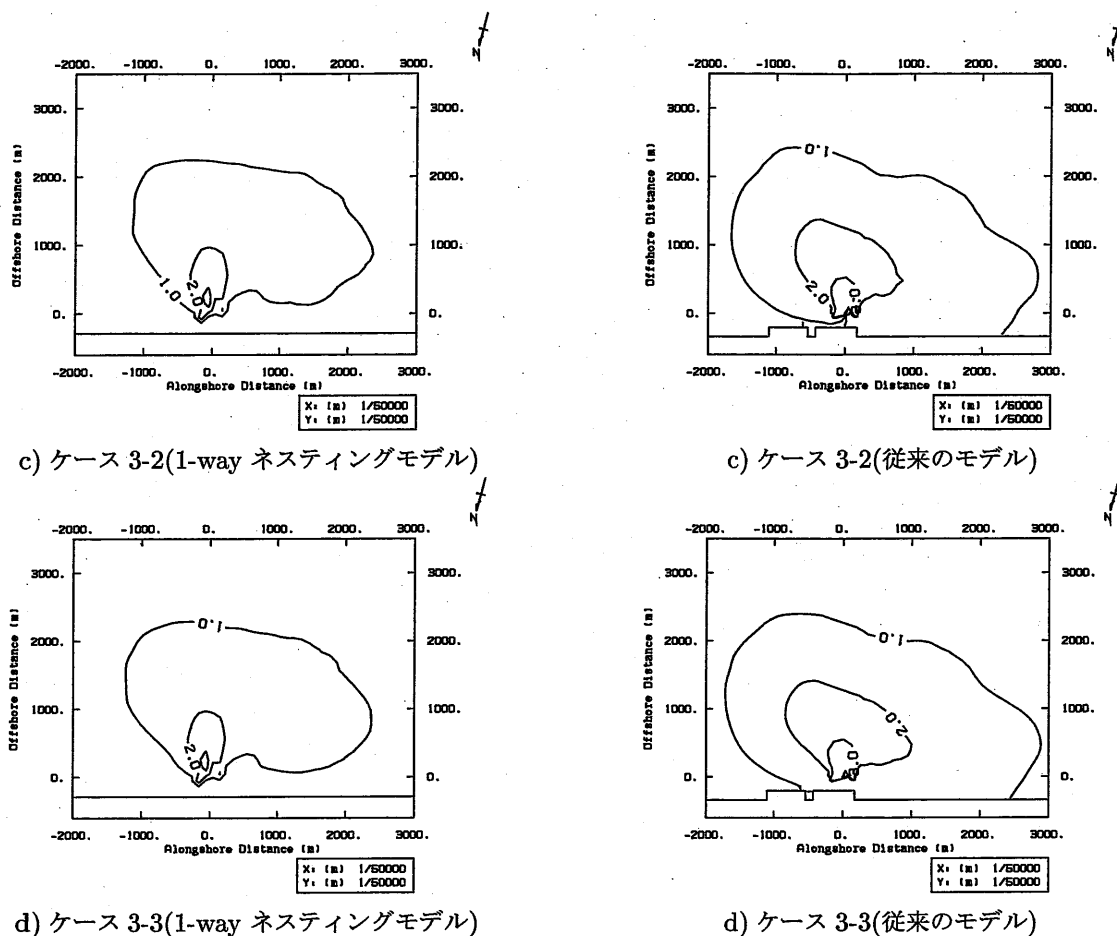


図 5.17 粘性・拡散係数を計算した結果 (図 5.16 の続き)

とにより、1-way ネスティングモデルの検討を行った。

表 5.8 に海域の粘性・拡散係数を変化させたケースを示す。図 5.16 に表層での水温上昇範囲を示す。

従来のモデルで計算された拡散範囲は、水平方向の粘性・拡散係数を変化させたケース 3-1 がケース 2 と同程度の結果となり、鉛直方向の粘性・拡散係数を変化させたケース 3-2,3 では、拡散範囲がケース 2 の結果に比べて沖合い方向に減少し、汀線方向に拡大する結果となった。これに対し、1-way ネスティングモデルでの計算結果は、従来のモデルと同程度の拡散範囲を示した。このことから、放水口近傍での海域の影響よりも噴流として温排水が拡散する領域を適切に選択できれば、係数を変えて 1-way ネスティングモデルを用いた拡散範囲の検討が行えると考えられる。

5.4.3 温排水拡散予測手法の提案

本章において得られた結果から、ネスティングモデルを用いた温排水拡散予測手法の提案を行う。

通常、温排水拡散予測モデルを用いた温排水拡散予測では、予備検討、詳細検討により行われる。予備工程は、放水口・地形の設定を確かめるために温排水の浮上するまでの軌跡および表層での浮上点等を評価する第 1 工程、海域の拡散に与える影響を調べるために、各係数の評価を行う第 2 工程に分けられる。そして、第 3 工程の詳細検討において、最終的な温排水の拡散範囲予測を行う。

このような全工程に対し、前章までのモデルを温排水拡散予測を適用すると、多大な計算時間を必要とする。しかし、予備検討では高い予測精度を必要としないが計算ケースが多く、詳細検討では十分な予測精度を必要とするが計算ケースが少ない場合が多いことから、本章で改良を行った2つのネスティングモデルを予備検討および詳細検討に使い分ければ、計算時間を短縮することが可能になると考えられる。

以上の考察より、温排水拡散予測における本モデルの適用においては、予備検討において計算負荷の小さい1-way ネスティングモデルを適用し、詳細検討において2-way ネスティングモデルを適用することを提案する。

5.5 まとめ

本研究では、3次元温排水拡散モデルの計算時間短縮を目的に、ネスティング法を用いたモデルへと改良を行った。なお、ネスティング法とは、複数の構造メッシュ系を使用し、複数のメッシュを境界で接続して、同時に計算する手法である。

ネスティング法を用いたモデルとして、一方向に情報を伝達する1-way、双方向の情報を伝達する2-wayのネスティングモデルを作成し、従来のモデルによる結果と比較することにより、ネスティングモデルの適用性および時間短縮性能について検討を行った。

ネスティングモデルを用いた数値解析では、ネスティングの領域を大領域・小領域の2つに分割して計算を行った。各放水形式により放水された温排水の拡散形態が、放水口近傍では、噴流としての空間的・時間的に短く拡散し、および放水口より遠方の海域では、空間的・時間的に長く拡散することから、この拡散形態を利用して、小領域では放水口を中心に細かいメッシュ系および大領域では小領域を囲む粗いメッシュ系を用いた。

1-way, 2-way ネスティングモデルを用いて、海域に流れがない場合、潮流流がある場合について計算を行い、前章までのモデルによる結果と比較することにより、ネスティングモデルの再現性・適用性の検討を行った。その結果を以下にまとめる。

1. 従来のモデルおよび1-way ネスティングを用いて流れがない場合の温排水拡散計算を行い、大・小領域の接合部の位置について検討を行った。ネスティングにおけるメッシュの接合部を400,600,800mと変化させて計算したが、どのケースにおいても従来のモデルと変わらない結果となり、ネスティングモデルを用いると従来のモデルに比較して約800倍の時間短縮が出来ることが分かった。
2. 海域に潮流がある場合における温排水拡散の計算を、従来のモデル、1,2-way ネスティングモデルを用いて行い、各潮時の水温・流速分布および全潮時の水温の拡散範囲を従来のモデルの結果と比較することにより、各ネスティングモデルの性能評価を行った。その結果、以下の結果が得られた。
 - 1-way ネスティングモデルでは、流れのない状態での計算結果を大領域の境界に設定したことから、汀線方向に拡散範囲が小さくなる傾向が見られたが、温排水の拡散範囲および沖合いの到達距離について従来のモデルと定性的に一致し、従来のモデルと比較して220倍の時間短縮が可能であることが分かった。
 - 2-way ネスティングモデルの温排水の拡散範囲・流速分布は従来のモデルと同等の結果となり、2-way ネスティングモデルが従来のモデルと同じ性能を有することが分かった。そして、

2-way ネスティングモデルを用いると、従来のモデルと比較して 1.5 倍程度時間短縮出来ることが分かった。

3. 海域の粘性・拡散係数を変化させた計算を 1-way ネスティングモデルを用いて行い、1-way ネスティングモデルが温排水拡散における海域の影響を定性的に再現できることを示した。

以上の結果により、ネスティングモデルが従来のモデルと同程度の性能を持つこと、計算時間を短縮できることが分かった。そして、1,2-way ネスティングモデルを利用した温排水拡散予測手法を提案できた。

参考文献

- Bao, X. W., J. Yan and W. X. Sun, 2000: A Three-dimensional Tidal Model in Boundary-fitted Curvilinear Grid. *Estuary, coastal and shelf science*, **50**, 775-788.
- Borthwick, A. G. L., S. Cruzleön and J. Jözsä, 2001: Adaptive quadtree model of shallow-flow hydrodynamics. *J. Hydraulic R.*, **39**, 4, 413-423.
- Lin, B. L. and R. A. Falconer, 1995: Modelling sediment fluxes in estuarine waters using curvilinear coordinate systems. *Estuary, coastal and shelf science*, **14**, 413-428.
- Rogers, B., M. Fujihara and A. G. L. Borthwick, 2001: Adaptive Q-tree Godunov-type scheme for shallow water equations. *Int. J. for Num. Meth. in Fluids*, **35**, 247-280.
- Ye, J. and J. A. Mccorquodale, 1997: Depth-averaged hydrodynamic model in curvilinear collocated grid. *ASCE J. Hydraulic Eng.*, **123**, 5, 380-388.
- 横山洋, 清水康行, 2001: CIP 法を用いた急勾配複断面蛇行水路の数値計算. 水工学論文集, **45**, 601-606.
- 細田尚, 2001: 一般座標系での任意曲面に沿う開水路流れの平面 2 次元モデルとその応用について. 水工学論文集, **45**, 607-612.
- 坂井伸一, 松梨史郎, 仲敷憲和, 坪野考樹, 丸山康樹, 1997: 3 次元 $k-\epsilon$ モデルによる沿岸域における水平重力噴流の計算. 水工学論文集, **41**, 537-542.
- 水鳥雅文, 坪野考樹, 坂井伸一, 仲敷憲和, 松梨史郎, 1999: 沿岸域に表層放水された重力噴流の 3 次元特性. 水工学論文集, **43**, 911-916.
- 川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 2000: 比構造格子の都市氾濫解析への適用. 水工学論文集, **44**, 461-466.
- 谷口伸行, 小林敏雄, 1989: ヴォロノイ図を用いた流れ場計算手法の構成. 生産研究, **41**, 84 - 91.
- 谷口伸行, 小林敏雄, 水尾勝, 1990: 複雑な自動車形状の流れ場数値シミュレーション. 生産研究, **42**, 10 - 15.
- 仲敷憲和, 松梨史郎, 坂井伸一, 丸山康樹, 1996: 水平方向に放出された重力噴流の挙動について. 水工学論文集, **40**, 537-542.
- 坪野考樹, 仲敷憲和, 丸山康樹, 1997a: 複数管から放出された水平重力噴流の特性, 一実験による現象解明と 3 次元数値計算法の適用性一. 研究報告:U 97057, 電力中央研究所.
- 坪野考樹, 仲敷憲和, 松梨史郎, 坂井伸一, 丸山康樹, 1997b: 複数管から放出された水平重力噴流に関する数値シミュレーション. 水工学論文集, **41**, 295-302.
- 坪野考樹, 仲敷憲和, 丸山康樹, 2000: 近接する表層放水口および水中放水口より同時放水される温排水の拡散挙動, 一 3 次元数値モデルの改良一. 研究報告:U 00013, 電力中央研究所.

- 田中昌宏, 稲垣聡, 2000: 外海水の浸入が内湾の水質環境に及ぼす影響に関する研究. 海岸工学論文集, **47**, 1061-1065.
- 二瓶泰雄, 灘岡和夫, 熊野良子, 2000: 新たなデータ同化手法に基づく開放性沿岸域のネスティング手法の提案. 海岸工学論文集, **47**, 461-465.
- 二瓶泰雄, 佐藤啓太, 灘岡和夫, 熊野良子, 西村司, 2003: 沿岸海水流動シミュレーションに対する新しい多重ネスティング計算法の開発. 土木学会論文集, **740II-64**, 171-183.
- 名古屋靖一郎, 2000: 非圧縮流体計算におけるソレイダル空間への射影法. 日本応用数理学会論文集, **10**, 3, 63-72.

第6章

結論

本研究では、序論で述べたように発電所から放水される温排水の数値モデルによる拡散範囲予測を目的に、数値モデルを構築するとともに、この数値モデルを水理実験結果および観測結果に適用して、再現性・適用性の検討を行った。

モデルの検討に際し、水中放水される温排水、および近接設置された水中放水口および表層放水口から同時放水される温排水の拡散予測を対象としていることから、これらの温排水の拡散形態について、温排水が、水中放水口から水面に浮上するまでの放水口近傍の領域、浮上後に表層で拡散する領域とに分けて検討を行った。

数値モデルは、非静水圧近似の3次元モデルとし、渦動粘性・拡散係数の計算には、 $k-\epsilon$ モデルを用いた。

一般に、発電所の水中放水口は複数管で構成されることから、複数管で構成される水中放水口から水平に放水される密度噴流を対象として、水理実験および数値解析を実施し、放水口近傍における密度噴流の拡散形態について検討を行った。そして、近接設置された水中放水口と表層放水口から放水される密度噴流を対象として、数値モデルによる検討とともに水理実験・観測を行い、表層における密度噴流の拡散形態についての検討を行った。

以下に、各章で得られた知見を要約し、結論とする。

第2章では、複数管で構成される水中放水口から水平に放水される密度噴流を対象に、放水口から水面に浮上するまでの放水口近傍における密度噴流の拡散特性について、実験的・数値解析的に検討を試みた。

水理実験では、複数管の基本となる2管の水中放水口から水平に放水される密度噴流の実験を行い、水温・流速の測定を行った。その結果、水平方向に水中放水される密度噴流では、放水口中心から底面までの距離、および密度フルード数からなる放水条件により、浮上経路となる場合と、浮上せずに直進経路となる場合の2つに分かれるが、2放水管の場合では、各噴流の影響により流速の低減が抑制されるため、単管の場合と比べて底面付近を這う経路となる傾向を示す。ただし、2放水管の間隔が、管の直径の10倍程度になると、各噴流間の相互作用は小さくなり、各噴流は単管から放水された場合と同様の希釈・拡散挙動を示す。そして、噴流の水平経路は、2放水口間において連行が抑制されるため、各噴流は流下距離 $x/d=20$ 付近より2管の内側に移動する結果となった。

流速および上昇水温の平均量の鉛直分布は、浮上経路および直進経路のどちらの放水条件でも、半振幅、経路で補正すると流下方向に相似形となり、ほぼ Gauss 分布で示される形状となる。また、変動量の鉛直分布も、流下方向に相似な形状となり、値が噴流の中心で小さく、噴流の端で大きくなる双頭形となり、変動量の最大値は平均量の 0.2 から 0.3 となる。

流速および上昇水温の平均量の水平分布は、2つの噴流によって連行希釈が抑制された結果、各噴流が重合する領域において分布が一樣となり、各変数の値が2つの噴流の内側で大きく、外側で小さくなる分布となる。また、変動量の分布は、値が2つの噴流の内側で小さく、外側で多くなる形状となる。

数値解析にあたり、非静水圧近似、および乱流モデル ($k-\epsilon$ モデル) を採用して、3次元数値モデルを構築した。そして、水理実験と数値解析の結果を比較することにより再現性の検討を行い、さらに噴流の拡散挙動について検討を行った。その結果、噴流が浮上経路となる場合、および底面近傍で直進経路となる場合の両条件のケースにおける、噴流の3次元 (水平、鉛直) な経路、噴流内の流速・水温の低減率や分布形、および変動強度等について、数値計算結果と測定結果は良く一致した。これらの結果により、水中放水口から海表面まで浮上するまでの放水口近傍での温排水の各噴流間の相互作用や底面の影響による連行量の抑制等の拡散挙動を、本数値モデルが精度よく計算できることが示された。

非静水圧の3次元数値モデルとしたことにより、密度噴流内の圧力低下を再現でき、複数管からの噴流が単管に比べて直進経路となりやすい結果や、噴流が一度直進経路をとると放水口から離れても、継続して直進する結果が再現された。

第3章では、ほぼ平行に近接設置された水中・表層放水口から同時放水される密度噴流の拡散特性について、実験的・数値解析的に検討を試みた。そして、実験および数値解析で得られた水温の鉛直分布について、クラスタ分析を行い、水中表層放水口から同時放水される密度噴流が相互干渉して鉛直混合する領域について検討を行った。

水理実験においては、まず海域に流れのない静止場の条件で水中単独・表層単独・水中・表層同時放水する密度噴流の水理実験を実施し、さらに海域に流れがある条件で水中・表層放水口から同時放水される密度噴流の水理実験を実施した。その結果、以下の結果が得られた。

同時放水された密度噴流における表層での拡散分布は、水中放水された密度フルード数の大きな噴流の影響を受け、表層放水された密度噴流が水中放水された密度噴流に連行され、表層放水単独での結果よりも、横断方向の拡散幅が小さくなる。放水方向の上昇水温最大値の経路は、汀線近傍では相対的に希釈効果が小さな表層放水口前面となるが、沖合いに進むにつれて、水中放水された噴流の連行を受けて、水中放水口側に移動する。そして、水中放水起因の噴流と連行された表層放水起因の噴流が相互干渉すると、希釈が一時的に悪くなり、さらに鉛直方向に混合が促進される結果が得られた。

海域に流れがある場合に同時放水される密度噴流は、水中放水口が上流にある場合と、ない場合で、両放水口からの噴流が相互干渉し、鉛直混合する様子が異なる結果が得られた。

数値解析では、2章で構築した3次元数値モデルを静止場で実施した水理実験に適用し、水中放水された密度噴流が水面に浮上した後の拡散挙動、表層放水された密度噴流の拡散挙動、同時放水された密度噴流の表層での拡散挙動について、計算結果と実験結果の比較を行い、再現性の検討を行った。その結果、以下の結果が得られた。

水中放水された密度噴流の表層における上昇水温最大値の経路および拡散範囲について、数値結果は実験結果とよい一致を示した。この結果および前章の結果の結果により、本モデルを用いて、水中放水される温排水の拡散範囲を予測することが可能であると考えられる。また、水中・表層同時放水された密度噴流の相互干渉する領域における、低減率の低下や鉛直方向の混合について、本数値モデルによりほぼ再現できた。この結果より、近接設置された水中・表層放水口から放水される温排水の拡散予想に本モデルが適用可能であると考えられる。

クラスタ分析を、実験および数値解析で得られた上昇水温を表層水温で正規化した鉛直分布について適用し、鉛直分布の分類を行った結果、以下の結果が得られた。

大量に測定された鉛直分布を客観的に分類することが出来た。さらに、計測水深よりも大きな層厚を持つ鉛直分布にたいしてもクラスター分析により分類が可能であることが確認できた。そして、分類された鉛直分布を用いることにより、温排水の拡散形態を表す指標である水温の鉛直分布の状態を面的に知ることが出来、特に静止場・流れありの条件での水中表層放水形式で放水される噴流が相互干渉し、鉛直的に混合する領域を特定することが出来た。

第4章では、実際の臨海発電所に近接設置された水中放水口および表層放水口から放水される密度噴流の拡散現象を対象に、観測および数値解析を実施し、特に、潮汐流動の影響をうける噴流の拡散挙動について検討を行った。

湾奥に表層放水口・湾口に水中放水口が近接設置されている海域において観測を行い、各潮時での温排水の拡散形態、および水温の鉛直分布の変化について検討を行った。

本海域では、潮汐流が、上げ潮・満潮時において北流となり、下げ潮・干潮時において南流となり、この潮汐流の影響をうけ、各放水口から放水される温排水の外海での上昇水温の拡散範囲は、この潮汐流の方向に拡散する。

湾奥から表層放水された温排水は、湾内で表層密度噴流として発達して湾口に到達するが、湾口での水中放水口近傍で、水中放水された温排水の影響により鉛直方向に混合する結果、外海での温排水影響がある領域では、大きな層厚をもつ鉛直分布となる。ただし、下げ潮・干潮時では、水中放水口の南側において、湾内で表層密度噴流として発達した鉛直分布のまま拡散する領域があり、外海での温排水拡散影響のある領域では、大きな層厚をもつ鉛直分布と小さな層厚をもつ鉛直分布が、水中放水する軸をはさんで混在する。この潮時において、水中放水口の前面では、水中放水された噴流が下層の冷たい環境水を表層まで連行するために水温が低下することから、上昇水温の水平分布は、二股に分かれる凹型の拡散分布となることが分かった。

本章では、海域の拡散特性と潮汐流動が取り扱えるように、2章で構築した数値モデルを改良した。ただし、本モデルでは、計算時間短縮のために水面変動と密度噴流を同時に計算せずに、水面を固定壁とし、あらかじめ別のモデルで計算した水面変動による静水圧を圧力項に足すことで、潮汐流を再現した。この方法を用いた数値モデルによる潮汐流は、静水圧近似で水面変動を計算する準3次元モデルと同程度の精度で計算できることが分かった。

数値解析結果により、水中放水される密度噴流の浮上経路が、潮時により異なることを示し、この浮上経路の違いにより、表層放水された密度噴流が水中放水の影響を受けて鉛直方向に混合する様子が異なる

ことを示した。

本海域において、温排水の拡散範囲の予測を行い、7年にわたり発電所が実施したモニタリング結果と比較した結果、予測された拡散範囲がモニタリング結果を包含し、沖合い方向および汀線方向の予測範囲が、モニタリング結果と適合した結果となった。

第5章では、複雑な放水形状や、複数の発電所からの温排水の拡散予測に対応することを目的に、複数のメッシュ系で計算できるネスティングの手法を採用し、4章までに構築を行ってきたモデルの改良を行った。

本研究では、接合部で情報(流速等)を一方向のみに伝達する1-way ネスティングモデル、および双方向に伝達する2-way ネスティングモデルの二つのネスティングモデルを構築した。そして、2つ以上の異なる計算メッシュをもつ計算領域を設定することによって、メッシュ数を減らし、各領域で計算される変数の情報をメッシュの接合部で共有することで接合部での流量熱量等の保存則を満足させて計算を行った。

本ネスティングモデルを用いた温排水拡散予測では、放水口を中心に細かいメッシュ系(小領域)、その外側に粗いメッシュ系(大領域)を設定し計算を行った。この二つのネスティングモデルと4章までに開発したモデルとで数値実験を行った結果、2-way ネスティングモデルが既開発のモデルと変わらない結果が得られ、時間短縮が可能となることを示した。また、1-way ネスティングモデルは、既開発モデルに比べて精度が落ちるものの、2-way ネスティングモデルや既開発モデルと比較して、大幅な時間短縮が可能となることを示した。最後に、各ネスティングモデルの予測精度と時間短縮の度合い、および温排水拡散予測の工程を考慮し、各ネスティングモデルを用いた温排水拡散予測手法の提案を行った。

以上、本研究で構築を行った数値モデルにより、水中放水口から、および近接設置された表層放水口・水中放水口から放水される温排水の拡散範囲予測することが可能と考えられる。

現在、本モデルは、実海域における温排水拡散予想に使用されつつある。特に、本モデルは、伊勢湾規模の湾内に設置されている全ての発電所から温排水が放水された場合や、放水条件が異なる水中放水口が近接して2基設置される場合の温排水拡散範囲予測に適用されており、本研究の成果およびモデルが工学的課題に応える実用性をもつことが示されたと考えられる。しかし、実際の適用により、海域流動の取り扱い、および河川影響の取り扱いなどの問題が指摘されており、今後のさらなる研究が必要であると考えられる。本研究が、温排水の拡散予測にさらに活用され、また、密度噴流の研究の一助になれば幸いである。

謝辞

学生時代から今日にいたるまで励まして下さり、また、本研究の取りまとめにあたり、終始懇切なるご指導、ご激励と、細部にわたるご教示を賜りました京都大学防災研究所所長 井上和也先生に深甚なる謝意を表します。また、京都大学防災研究所教授 中川一先生には、折に触れてさまざまなご助言をいただきました。ここに記して、心よりお礼申し上げます。

本研究は、財)電力中央研究所で著者が実施してきた研究成果をとりまとめたものです。本研究の遂行にあたり、財)電力中央研究所の環境科学部の皆様方には、さまざまなご支援をいただきました。特に、仲敷憲和氏、坂井伸一氏、松梨史郎氏、および平口博丸氏からは、多大なご助言、ご協力およびご支援を賜りました。また、財)電力中央研究所 当時の荒木洋環境下学部長 (現、(株)恒完工業)、角湯正剛所長、丸山孝樹重点課題責任者 (部長)、宮永洋一研究企画環境推進担当 (部長)、水鳥正文環境科学部長には、ご理解、ご支援を賜りました。ここに記して心よりお礼申し上げます。

(株)アーク情報システムの名古屋靖一郎様には、プログラムの開発・構築にあたり、ご支援・協力を賜りました。(株)CRS の中井健二様には、水理実験にご協力していただきました。ここに記して心よりお礼申し上げます。